

OBTENCIÓN DE LA BASE DE DATOS CON LA INFORMACIÓN DE  
VOLTAJES Y CORRIENTES DE CORTOCIRCUITO PARA TODOS LOS  
POSIBLES NODOS DE FALLA DE UN CIRCUITO DE 13.2 kV.

STIVEN SOLANO ARBOLEDA

UNIVERSIDAD DEL VALLE  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA  
SANTIAGO DE CALI  
2017

OBTENCIÓN DE LA BASE DE DATOS CON LA INFORMACIÓN DE  
VOLTAJES Y CORRIENTES DE CORTOCIRCUITO PARA TODOS LOS  
POSIBLES NODOS DE FALLA DE UN CIRCUITO DE 13,2 kV.

STIVEN SOLANO ARBOLEDA

Trabajo de grado presentado como requisito  
para optar al título de ingeniero electricista.

Directores:

Ing. Nayiver Gladys Caicedo Delgado, Ph.D.  
Ing. Wilman Jesús Pisso Taimal

UNIVERSIDAD DEL VALLE  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA  
SANTIAGO DE CALI  
2017

Aprobada por la facultad de  
Ingeniería, en cumplimiento de los  
requisitos exigidos para optar por el  
título de:

Ingeniero Electricista

---

Director trabajo de grado:  
Ing. Gladys Caicedo Delgado Ph.D

---

Director trabajo de grado:  
Ing. Wilman Jesús Pisso Taimal

---

Firma del jurado

---

Firma del jurado

Universidad del Valle  
Santiago de Cali, 2017

*Este de trabajo de grado se lo dedico a Dios, mi familia en especial a mis padres, mi compañera sentimental y sus padres, por haberme acompañado, fortalecido y brindado su apoyo incondicional en todo momento.*

## AGRADECIMIENTOS

A mis directores, profesora Gladys N. Caicedo Delgado Ph.D e Ing. Wilman J. Pisso Taimal, por su apoyo, dedicación, acompañamiento y confianza en la realización de este trabajo de grado.

A la Empresa de Energía del Pacífico -EPSA- por haber facilitado la información y el software de simulación requerido para el desarrollo de este trabajo de grado.

Al programa de ingeniería eléctrica de la Universidad del Valle por haberme brindado la oportunidad de realizar mis estudios de pregrado.

A los profesores e integrantes de la Escuela de Ingeniería Eléctrica y Electrónica que hicieron parte en el proceso de mi formación personal, académica y profesional


Al Laboratorio de Alta Tensión de la Universidad del Valle por haberme dado la oportunidad de desempeñar labores relacionadas con mi formación profesional.

A mis amigos y compañeros de estudio que hicieron parte de este proceso de formación.

## CONTENIDO

pág.

LISTA DE FIGURAS .....	9
LISTA DE TABLAS .....	12
RESUMEN .....	13
ABSTRACT .....	14
INTRODUCCIÓN .....	15
1 CARACTERIZACIÓN EL CIRCUITO DE DISTRIBUCIÓN RÍO CLARO DE 13.2 kV DEL SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN DE EPSA DE LA SUBESTACIÓN JAMUNDÍ 115 Kv .....	16
1.1 Introducción .....	16
1.2 SISTEMA DE TRANSMISIÓN .....	16
1.3 SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN .....	17
1.3.1 Centro de distribución .....	17
1.3.2 Circuito bajo estudio .....	17
2 IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO ELÉCTRICO DEL CIRCUITO DE DISTRIBUCIÓN RÍO CLARO DE 13.2 kV EN LA HERRAMIENTA COMPUTACIONAL DlgSILENT.....	20
2.1 INTRODUCCIÓN.....	20
2.2 MODELO ELÉCTRICO PARA LA SIMULACIÓN DE LÍNEAS DE SUMINISTRO DE ENERGÍA EN DlgSILENT. ....	20
2.3 REPRESENTACIÓN GRÁFICA DE LOS ELEMENTOS DEL SISTEMA DE POTENCIA EN DlgSILENT.....	21
2.4 INTERFACES EN DlgSILENT .....	22
2.5 ESTRUCTURA DE LA INTERFAZ DGS.....	22
2.5.1 Jerarquía de objetos en DGS. ....	23
2.5.2 Archivos con formato de Microsoft Excel. ....	23
2.6 IMPORTAR Y REPRESENTAR LOS PARÁMETROS ELÉCTRICOS DEL CIRCUITO MEDIANTE LA INTERFAZ DGS DE DlgSILENT.....	30
3 METODOLOGÍA PARA LA UBICACIÓN DE FALLAS .....	33
3.1 INTRODUCCIÓN.....	33
3.2 DESARROLLO DE LA METODOLOGÍA PARA LA UBICACIÓN DE FALLAS .....	34
3.2.1 Datos de entrada .....	34

3.2.2 Lenguaje de programación en DIgSILENT - DPL -.....	35
3.3 IMPLANTACIÓN DE LA METODOLOGÍA PARA LA UBICACIÓN DE FALLAS .....	42
4 VALIDACIÓN DEL MODELO IMPLEMENTADO EN DIgSILENT DEL CIRCUITO RÍO CLARO 13.2 kV.....	43
4.1 INTRODUCCIÓN.....	43
4.2 VALIDACIÓN DEL MODELO IMPLEMENTADO MEDIANTE EL MÓDULO DE FLUJO DE POTENCIA DE DIgSILENT.....	43
4.2.1 Carga máxima y mínima del circuito Río Claro 13.2 kV.....	44
4.2.2 Módulo de flujo de potencia en DIgSILENT.....	46
4.2.3 Resultados obtenidos del módulo de flujo de potencia de DIgSILENT sin el uso de alimentadores ( <i>feeder</i> ).....	48
4.2.4 Configuración del alimentador: <i>feeder</i> ( <i>ElmFeeder</i> ,  ). .....	49
4.2.5 Resultados obtenidos del módulo de flujo de potencia de DIgSILENT con el uso de alimentadores ( <i>feeder</i> ). .....	49
4.3 VALIDACIÓN DEL MODELO IMPLEMENTADO MEDIANTE EL MÓDULO DE CORTOCIRCUITO DE DIgSILENT.....	50
4.3.1 Falla y tipos de fallas en sistemas de suministro de energía eléctrica. 51	
4.3.2 Selección del método para el cálculo de la corriente de cortocircuito en DIgSILENT.....	51
4.3.3 Método completo ( <i>Complete Method</i> ).....	52
4.3.4 Módulo de cortocircuito en DIgSILENT.....	53
4.3.5 Clasificación y selección de los datos de entrada (casos de cortocircuito). .....	56
4.3.6 Datos reales de voltaje, corriente, potencia (P y Q) en estado de prefalla y durante falla y valores calculados de resistencia de falla.....	56
4.3.7 Resultados obtenidos mediante el módulo de cortocircuito de DIgSILENT. ....	61
5 SIMULACIONES DE CORTOCIRCUITO MONOFÁSICO A TIERRA, LÍNEA A LÍNEA TRIFÁSICO EN LOS POSIBLES NODOS DE FALLA DEL CIRCUITO DE RÍO CLARO 13.2 kV.....	64
5.1 INTRODUCCIÓN.....	64
5.2 LENGUAJE DE PROGRAMACIÓN EN DIgSILENT - DPL-.....	64
5.2.1 Introducción. ....	64
5.2.2 Estructura principal del comando DPL.....	65
5.2.3 Crear y ejecutar comandos en DPL.....	65
5.2.4 Interfaz gráfica del comando DPL.....	66

5.3 POSIBLES NODOS DE FALLA DEL CIRCUITO DE DISTRIBUCIÓN OBTENIDOS MEDIANTE EL COMANDO DPL DE DlgSILENT.....	67
5.3.1 Introducción. ....	67
5.3.2 Arquitectura de programación en el comando DPL. ....	68
5.3.3 Resultados obtenidos mediante el comando DPL <i>FaultReport</i> en DlgSILENT .....	74
6 CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS .....	80
6.1 CONCLUSIONES. ....	80
6.2 TRABAJOS FUTUROS.....	81
BIBLIOGRAFÍA.....	82
ANEXOS.....	83
 Anexo A. Oscilogramas de tensión y corriente en prefalla y durante falla. ....	83
Anexo B. Líneas de instrucciones ( <i>script</i> ) del comando DPL principal: <i>FaultReport</i> .....	87
Anexo C. Líneas de instrucciones ( <i>script</i> ) de los objetos internos del comando DPL principal: <i>FaultReport</i> .....	89
Anexo D. Base de datos con la información de voltajes y corrientes para todos los posibles nodos de falla y la ubicación grafica en diagrama unifilar para el caso de cortocircuito 1. ....	91
Anexo E. Base de datos con la información de voltajes y corrientes para todos los posibles nodos de falla y la ubicación grafica en diagrama unifilar para el caso de cortocircuito 2. ....	93
Anexo F. Base de datos con la información de voltajes y corrientes para todos los posibles nodos de falla y la ubicación grafica en diagrama unifilar para el caso de cortocircuito 4. ....	95



## LISTA DE FIGURAS

pág.

Figura 1. Sistema de transmisión regional de EPSA. ....	16
Figura 2. Diagrama unifilar subestación Jamundí.....	17
Figura 3. Diagrama unifilar simplificado circuito Río Claro 13.2 kV.....	18
Figura 4. Integración de datos entre la Base de Datos de Instalaciones (BDI) y DIgSILENT.....	20
Figura 5. Esquema representativo para la conexión de elementos en DIgSILENT.....	22
Figura 6. Jerarquía de los elementos de un sistema de potencia en DIgSILENT.....	23
Figura 7. Tabla general.....	24
Figura 8. Información de la red eléctrica.....	24
Figura 9. Información de terminales o nodos del circuito eléctrico.....	25
Figura 10. Información de las líneas del circuito eléctrico.....	25
Figura 11. información de los elementos de protección, maniobra y conexión. ....	26
Figura 12. Información de los elementos de carga. ....	27
Figura 13. Elementos para compensación de potencia reactiva.....	27
Figura 14. Parámetros técnicos y eléctricos de los conductores del circuito. ...	28
Figura 15. Datos de la red externa de alimentación.....	29
Figura 16. Conexión de líneas a los terminales o nodos del circuito eléctrico. ....	29
Figura 17. Ajustes para representar el circuito eléctrico en un diagrama unifilar. ....	30
Figura 18. Ubicación espacial de los elementos del sistema potencia en la ventana del editor gráfico de DIgSILENT.....	30
Figura 19. Importar datos mediante la interfaz DGS.....	30
Figura 20. Representación de los parámetros eléctricos del circuito Río Claro 13.2 kV mediante diagrama unifilar en la ventana del editor gráfico de DIgSILENT.....	31
Figura 21. Plano cartográfico del circuito Río Claro 13.2 kV en los corregimientos de influencia en el municipio de Jamundí. ....	32
Figura 22. Metodología propuesta: Algoritmo para ubicación de fallas.....	34
Figura 23. Algoritmo para la identificación del tipo de falla y las fases involucradas.....	36

Figura 24. Conexión de las redes de secuencia para simular una falla monofásica de la fase <i>a</i> en el nodo <i>k</i> .....	38
Figura 25. Conexión de las redes de secuencia positiva y negativa para una falla línea a línea en el nodo <i>k</i> .....	39
Figura 26. Curva de carga para potencia activa del circuito Río Claro 13.2 kV .....	44
Figura 27. Curva de carga para potencia reactiva del circuito Río Claro 13.2 kV .....	45
Figura 28. Ventana de dialogo para el cálculo de flujo de potencia. ....	46
Figura 29. Valores obtenidos a partir del cálculo de cortocircuito. ....	51
Figura 30. Opciones básicas del módulo de cortocircuito. Método completo ...	53
Figura 31. Modelo de la impedancia de falla para cortocircuito: a) trifásico, b) doble línea a tierra, c) línea a línea y d) monofásico a tierra. ....	55
Figura 32. Opciones avanzadas del módulo de cortocircuito: Método completo .....	55
Figura 33. Caso de cortocircuito 1: Oscilograma de corriente y tensión en prefalla y durante falla monofásica a tierra. ....	57
Figura 34. Ubicación de los nodos de falla para los cinco casos de cortocircuito .....	59
Figura 35. Estructura del comandos DPL .....	65
Figura 36. Interfaz gráfica del comando DPL .....	66
Figura 37. Parámetros de entrada ingresados a través de la interfaz gráfica DPL .....	69
Figura 38. Arreglo de las columnas en Excel para obtener la base de datos con la información del voltaje y la corriente de cortocircuito para todos los posibles nodos de falla. ....	74
Figura 39. Base de datos con la información de voltaje y corriente para todos los posibles nodos de falla del caso de cortocircuito 3. ....	75
Figura 40. Ubicación grafica sobre el diagrama unifilar para todos los posibles nodos de falla del caso de cortocircuito 3. ....	76
Figura 41. Base de datos con la información de voltaje y corriente para todos los posibles nodos de falla del caso de cortocircuito 3. ....	77
Figura 42. Ubicación grafica sobre el diagrama unifilar para todos los posibles nodos de falla del caso de cortocircuito 5. ....	78
Figura 43. Caso de cortocircuito 2: Oscilograma de corriente y tensión en prefalla y durante falla monofásica a tierra. ....	83
Figura 44. Caso de cortocircuito 3: Oscilograma de corriente y tensión en prefalla y durante falla línea a línea. ....	84

Figura 45. Caso de cortocircuito 4: Oscilograma de corriente y tensión en prefalla y durante falla línea a línea. ....	85
Figura 46. Caso de cortocircuito 5: Oscilograma de corriente y tensión en prefalla y durante falla trifásica. ....	86
Figura 47. Líneas de instrucciones ( <i>script</i> ) del objeto interno <i>ShcCalc</i> (comando DPL).....	89
Figura 48. Líneas de instrucciones ( <i>script</i> ) del objeto interno <i>InitMatrix</i> (comando DPL).....	89
Figura 49. Líneas de instrucciones ( <i>script</i> ) del objeto interno <i>WriteMatrix</i> (comando DPL).....	90
Figura 50. Base de datos con la información de voltaje y corriente para todos los posibles nodos de falla del caso de cortocircuito 1.....	91
Figura 51. Ubicación grafica sobre el diagrama unifilar para todos los posibles nodos de falla del caso de cortocircuito 1.....	92
Figura 52. Base de datos con la información de voltaje y corriente para todos los posibles nodos de falla del caso de cortocircuito 2.....	93
Figura 53. Ubicación grafica sobre el diagrama unifilar para todos los posibles nodos de falla del caso de cortocircuito 2.....	94
Figura 54. Base de datos con la información de voltaje y corriente para todos los posibles nodos de falla del caso de cortocircuito 4.....	95
Figura 55. Ubicación grafica sobre el diagrama unifilar para todos los posibles nodos de falla del caso de cortocircuito 4.....	96

## LISTA DE TABLAS

pág.

Tabla 1. Características de los elementos del Circuito Río Claro 13.2 kV de la subestación Jamundí .....	18
Tabla 2. Ajuste de corriente para los equipos de corte del Circuito Río Claro ..	19
Tabla 3. Valores de potencia activa y potencia reactiva de las Figuras 26 y 27 .....	45
Tabla 4. Potencia activa y reactiva de los reconectores del circuito Río Claro. ....	46
Tabla 5. Datos de voltaje, potencia activa y potencia reactiva obtenidos mediante el módulo de flujo de potencia de DIgSILENT sin el uso de alimentadores ( <i>feeder</i> ).....	48
Tabla 6. Comparación de datos real vs datos simulados para estado de carga máxima. ....	49
Tabla 7. Comparación de datos real vs datos simulados para estado de carga mínima. ....	50
Tabla 8. Datos de tensión y corriente en prefalla y durante falla a partir de los oscilogramas de la Figura 33 y de la Figura 43 a la Figura 46.....	58
Tabla 9. Valores de potencia activa y potencia reactiva en estado de prefalla para los caso de cortocircuito de 1 a 5.....	60
Tabla 10. Resistencias de falla calculada para los cinco casos de cortocircuito.....	60
Tabla 11. Valores de cortocircuito reales, simulados y error relativo porcentual para los cinco caso de cortocircuito. ....	61
Tabla 12. Resumen de casos de cortocircuito y de los resultados de la base de datos. ....	79

## RESUMEN

En este trabajo de grado se aborda el tema de ubicación de fallas en sistemas de distribución de energía eléctrica y se plantea ubicar los posibles puntos de falla, utilizando el modelo eléctrico del circuito de distribución Río Claro 13.2 kV, el cual se implementó en la herramienta computacional DlgSILENT PowerFactory.

En el capítulo 1 se caracteriza el sistema de distribución Río Claro 13.2 kV, en el cual se presenta la cantidad y tipo de elementos que lo conforman. También se muestra en detalle el tipo y la configuración de los elementos de protección ubicados en el circuito.

En el capítulo 2 se presentan los requerimientos y el procedimiento llevado a cabo para organizar la información de la Base de Datos de Instalación -BDI- del circuito de distribución y representarla como un modelo eléctrico en la herramienta computacional DlgSILENT PowerFactory

En el capítulo 3 se presenta la metodología para la ubicación de falla propuesta en el trabajo de grado de maestría del Ing. Wilman J. Pisso T. y se especifica la información que se utilizó para desarrollar este trabajo de grado.

En el capítulo 4 se valida el modelo eléctrico del circuito de distribución en DlgSILENT PowerFactory mediante dos formas de simulación: flujo de potencia y cortocircuito.

En el capítulo 5 se describe el Lenguaje de Programación de DlgSILENT PowerFactory -DPL- y la arquitectura de programación implementada para obtener de forma automática la base de datos con información de voltaje y corriente de cortocircuito para todos los posibles nodos de falla.

En el capítulo 6 se presentan las conclusiones de este trabajo de grado y se proponen trabajos futuros.

*Palabras claves: Circuito de distribución, DlgSILENT, resistencia de falla, módulo de flujo de potencia, módulo de cortocircuito, comando DPL.*

## ABSTRACT

This document addresses the location of faults in electric power distribution systems and locates fault points using the 13.2 kV distribution circuit model, which was implemented in the DIgSILENT PowerFactory Computational tool.

In chapter 1, the Rio Claro 13.2 kV distribution system is characterized, in which the quantity and type of elements that make up it are presented. It also shows in detail the type and configuration of the protection elements located in the circuit.

Chapter 2 presents the requirements and procedure carried out to organize the information of the database of the installation -BDI- the distribution circuit and the representation as an electric model in the computational tool DIgSILENT PowerFactory

Chapter 3 presents the methodology for the fault location proposed by Eng. Wilman J. Pisso T. and specifies what is used to develop these documents

In Chapter 4, the electrical model of the distribution circuit is validated in DIgSILENT PowerFactory by means of two simulation forms: load flow and short circuit.

Chapter 5 describes the programming language of DIgSILENT PowerFactory - DPL- and the programming architecture implemented to automatically obtain the database with voltage information and short-circuit current for all possible fault nodes.

Chapter 6 presents the conclusions of this document and proposes future work.

*Key words: Distribution circuit, DIgSILENT, fault resistance, load flow module, short-circuit module, DPL command.*

## INTRODUCCIÓN

La resolución 098 de 2008 de la Comisión de Regulación de Energía y Gas (CREG) indica que la calidad del servicio de los sistemas de distribución local, SDL, se evaluará trimestralmente en términos de la calidad media brindada por el operador de red a sus usuarios. La calidad del servicio es un indicador que evalúa la continuidad en el suministro de energía eléctrica a los usuarios finales.

El suministro de energía se puede ver interrumpido por algún tipo de falla, la cual tiene diversos orígenes, y puede ser transitoria o permanente. Cuando se trata de fallas permanentes el problema se centra en ubicar el punto de falla y restablecer el servicio de suministro de energía.

La ubicación del punto de falla le puede tomar mucho tiempo al personal encargado de restablecer el suministro de energía eléctrica, debido a la topología radial y altamente ramificado de los sistemas de distribución.

Según [1], se denomina nodo a las uniones formadas cuando dos o más elementos de un circuito se conectan a sus terminales. Por lo anterior, se designan como un nodo en el sistema de distribución de energía eléctrica a cada unión entre las líneas aéreas, los elementos aislantes y los postes o soporte.

En este trabajo de grado se busca determinar un listado de posibles nodos de falla para el circuito de distribución Río Claro 13.2 kV. Para esto se cuenta con la información de los elementos de medida y protección del circuito en estado de prefalla, durante falla y posfalla. Se empleará la metodología para la ubicación de fallas propuesta en el trabajo de grado del ing. Wilman J. Pisso y se automatizará el proceso de simular y obtener la base de datos con los posibles nodos de falla.

Finalmente, en este trabajo de grado se enfoca en la localización de los posibles puntos de falla mediante el uso de información de corriente y tensión durante falla y el modelo del circuito de distribución implementado en el software para análisis de sistemas de potencia DIgSILENT PowerFactory. Este método de ubicación de fallas es conocido en la literatura como Métodos Basados en el Modelo (MBM)

# 1 CARACTERIZACIÓN EL CIRCUITO DE DISTRIBUCIÓN RÍO CLARO DE 13.2 kV DEL SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN DE EPSA DE LA SUBESTACIÓN JAMUNDÍ 115 Kv

## 1.1 Introducción

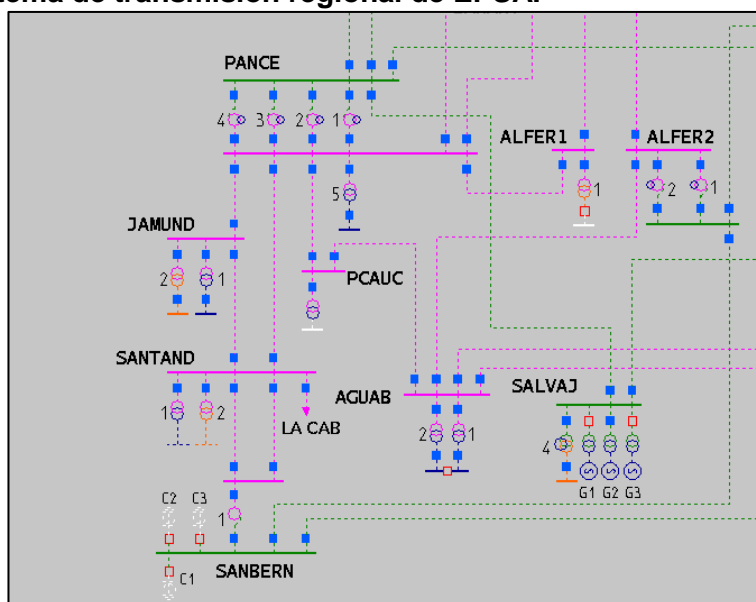
En este capítulo se hace una descripción de una parte del sistema eléctrico de potencia de la Empresa de Energía del Pacífico S.A E.S.P -EPSA-, con la finalidad de ubicar e identificar las características del sistema de distribución bajo estudio de este trabajo de grado.

El sistema bajo estudio corresponde al circuito Río Claro 13.2 kV de la subestación Jamundí perteneciente a la red de EPSA y se presenta el resumen de los elementos y parámetros que se tuvieron en cuenta para la implementación de la metodología de búsqueda de fallas.

## 1.2 SISTEMA DE TRANSMISIÓN

La subestación Jamundí de EPSA opera normalmente en forma anillada en el Sistema de Transmisión Regional (STR), para lo cual cuenta con dos líneas de transmisión que cierran el anillo a 115 kV: una línea desde la subestación Pance y otra desde la subestación Santander propiedad de la Compañía Energética de Occidente (CEO), tal como se observa en el diagrama unifilar de la Figura 1.

**Figura 1. Sistema de transmisión regional de EPSA.**



Fuente: Sistema SCADA de EPSA

La subestación Jamundí se alimenta por dos líneas de 115 kV desde la subestación Pance y desde la subestación Santander, ante la contingencia de una de estas líneas, la otra línea puede suministrar la potencia necesaria para alimentar la demanda de la subestación Jamundí.



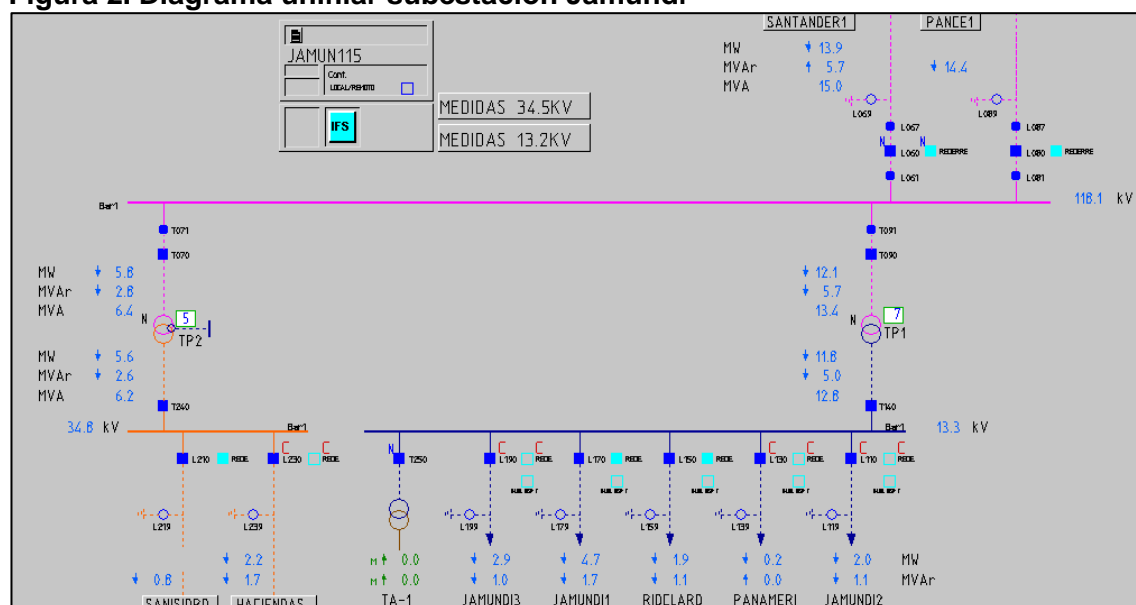
### 1.3 SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN

A continuación se describen los principales componentes involucrados en el proceso de distribución de energía en el nivel de tensión 34.5 kV y 13.2 kV para la subestación Jamundí.

#### 1.3.1 Centro de distribución

El sistema de distribución de la subestación Jamundí cuenta con dos transformadores TP1 (115/13.2 kV) y TP2 (115/34.5 kV) que alimentan la demanda en nivel de tensión de 34.5 kV y 13.2 kV, tal como se observa en el diagrama unifilar de la subestación Jamundí de la Figura 2.

Figura 2. Diagrama unifilar subestación Jamundí



Fuente: Sistema SCADA de EPSA

De acuerdo a la Figura 2, se observa que el transformador TP1 (115/13.2 kV) alimenta cinco (5) circuitos de nivel de tensión 13.2 kV y el transformador TP2 (115/34.5 kV) alimenta dos (2) circuitos de nivel de tensión 34.5 kV.

#### 1.3.2 Circuito bajo estudio

Para el desarrollo de este trabajo de grado, se tomó como caso de estudio el Circuito Río Claro de 13.2 kV de la subestación Jamundí, en la Figura 3 se presenta el diagrama unifilar simplificado del Circuito Río Claro 13.2 kV con los elementos de corte intermedios que constituyen este circuito.

The map displays a network of roads and locations. Key roads include L170, L130, L110, L190, L150, and L230. Locations marked include Jamundi1, Jamundi2, Jamundi3, Rioclaro, Casuca, Cascarilla, Terranova, San Isidro, Potrerito, Hdas de Potrerito, Villacal, and Terrar. Road segments are labeled with codes such as RB592, IB006, IB005, RB335, RB389, IB054, RB388, RB387, IB050, RB528, RB386, RB125, RB124, RB555, and RB126. A yellow box highlights a specific area in the bottom left corner.

El Circuito Río Claro de la subestación Jamundí es un circuito de distribución con nivel de tensión de 13.2 kV, con las siguientes características: Extensión de red de 177.05 km, 523 centros de transformación o transformadores de distribución, 6038 clientes, 2472 nodos o apoyos, 2448 tramos ubicados entre nodo y nodo, un interruptor cabecera (L150) con capacidad de 630 A y seis reconectores instalados a lo largo del circuito (RB124, RB125, RB126, RB528, RB542, y RB555).

En la Tabla 1 se presenta una descripción básica de los equipos de corte que conforman el Circuito Río Claro 13.2 kV de la subestación Jamundí. Estos datos han sido tomados de la Base de Datos de Instalaciones (BDI) de la Empresa de Energía del Pacífico, EPSA. En la Tabla 1, la columna: Estado del Elemento indica el estado del equipo bajo condiciones normales de operación de la red eléctrica, este estado puede cambiar para realizar transferencias hacia otro circuito.

EQUIPO	TIPO DE ELEMENTO	UBICACIÓN (NODO)	MARCA	MODELO	ESTADO DEL ELEMENTO
L150	Interruptor cabecera	Subestación Jamundí	AREVA	HVX17-25-06E210	CERRADO
RB124	Reconectador	15154	COOPER	NOVA 15 FORM 4C	CERRADO
RB125	Reconectador	14500	SCHNEIDER	U27 ADV2	CERRADO
RB126	Reconectador	25345	SCHNEIDER	U27 ADV2	CERRADO
RB528	Reconectador	114590	SCHNEIDER	U27 ADV2	ABIERTO
RB542	Reconectador	20817	SCHNEIDER	U27 ADV2	CERRADO
RB555	Reconectador	225859	SCHNEIDER	U27 ADV2	CERRADO

18

En la Tabla 2 se presentan los valores de corriente ajustados para cada uno de los equipos de corte, que hacen parte del circuito Río Claro 13.2 kV de la subestación Jamundí.

**Tabla 2. Ajuste de corriente para los equipos de corte del Circuito Río Claro**

Ajustes de protecciones Circuito Río Claro 13.2 kV de la subestación Jamundí							
	Interruptor cabecera L150	Reconectador					
		RB124	RB125	RB126	RB528	RB542	RB555
<b>MARCA RELÉ</b>	MICOM AREVA	COOPER	SCHNEID ER	SCHNEID ER	SCHNEID ER	SCHNEID ER	SCHNEID ER
<b>TIPO RELÉ</b>	P139	NOVA 15 FORM 4C	U27 ADVC2	U27 ADVC2	U27 ADVC2	U27 ADVC2	U27 ADVC2
<b>I ARRANQUE FASES</b>	396 A	160 A	100 A	100 A	500 A	250 A	100 A
<b>I ARRANQUE TIERRA</b>	162 A	70 A	40 A	40 A	500 A	70 A	40 A

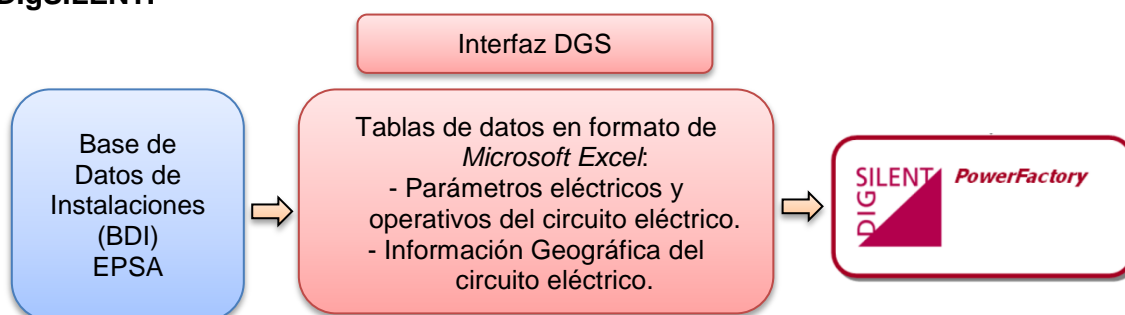
Fuente: Base de Datos de Protecciones de EPSA

## 2 IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO ELÉCTRICO DEL CIRCUITO DE DISTRIBUCIÓN RÍO CLARO DE 13.2 kV EN LA HERRAMIENTA COMPUTACIONAL DIgSILENT

### 2.1 INTRODUCCIÓN

En este capítulo se presenta el procedimiento para la implementación del circuito de distribución Río Claro de 13.2 kV del sistema de distribución de EPSA, en la herramienta computacional para el análisis de sistemas de potencia DIgSILENT PowerFactory. La información de los parámetros eléctricos del circuito en estudio se obtendrán a partir de los valores suministrados por la Base de Datos de Instalaciones -BDI- de EPSA y serán organizados en tablas de *Microsoft Excel*. Luego estos datos se importarán mediante la interfaz bidireccional DGS de DIgSILENT PowerFactory tal como se ilustra en la Figura 4. De aquí en adelante solo se empleará la palabra DIgSILENT al referirse a tal herramienta computacional.

**Figura 4. Integración de datos entre la Base de Datos de Instalaciones (BDI) y DIgSILENT.**



Fuente: [2]

Los datos relevantes tomados desde la Base de Datos de Instalaciones (BDI) se agrupan de la siguiente forma:

- Identificación mediante códigos y ubicación geográfica de elementos como: subestación asociada al circuito, apoyos, tramos de conductores entre apoyos, fusibles, puentes, interruptores, seccionadores y transformadores.
- Parámetros eléctricos: frecuencia nominal, tensión nominal, impedancia de secuencia positiva, negativa y cero y potencia de los centros de transformación o transformadores de distribución.

### 2.2 MODELO ELÉCTRICO PARA LA SIMULACIÓN DE LÍNEAS DE SUMINISTRO DE ENERGÍA EN DIgSILENT.

DIgSILENT permite representar modelos de líneas en DC y AC para circuitos trifásicos, bifásicos y monofásicos, con o sin hilo neutro o conductores de tierra. También permite representar circuitos simples o múltiples (en paralelo) con o sin acoplamiento mutuo. La representación en la ventana del editor gráfico de DIgSILENT se realiza mediante un diagrama unifilar [3].

Una de las posibilidades que ofrece DigSILENT es ingresar los parámetros de una línea que dependen de diferentes constantes y de la frecuencia. Estos modelos requieren información adicional, por ejemplo las características mecánicas de las estructuras de soporte.

EL modelo que se utilizó para ingresar los parámetros eléctricos del circuito en estudio está basado en tipos de líneas (*TypLne*, véase el numeral 2.5.2.4) donde los parámetros son dados en unidad de longitud a la frecuencia del sistema. Dado lo anterior, las simulaciones de flujo de potencia y cortocircuito están restringidas por la frecuencia a la cual fueron obtenidos los parámetros eléctricos del circuito en estudio, para este caso 60 Hz.

Los datos de las líneas pueden ser ingresados como parámetros concentrados (modelo PI) o distribuidos. Para líneas largas se prefiere el modelo de parámetros distribuidos, ya que se obtienen resultados muy precisos, mientras que el modelo de parámetros concentrados, proporciona resultados apropiados para líneas cortas [1].

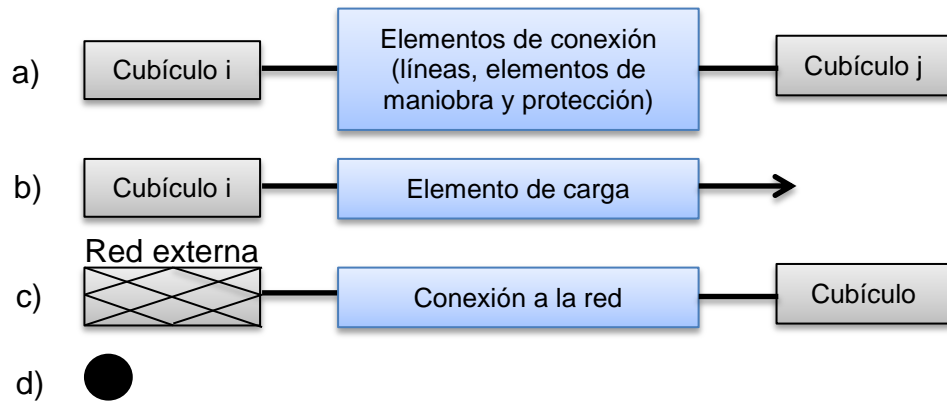
El modelo implementado en el caso de estudio es el de parámetros concentrados (modelo PI). En *ElmLne* (véase el numeral 2.5.2.4) se ingresa la longitud del tramo entre dos apoyos y en *TypLne* (véase el numeral 2.5.2.8) se ingresan los parámetros eléctricos de cada tramo. Finalmente, el circuito en estudio estará representado por  $n$  número de tramos y cada tramo tendrá diferentes parámetros eléctricos en función de su longitud.

En *TypLne* los parámetros de entrada son definidos en términos de la resistencia y reactancia de secuencia positiva, negativa y cero. Los parámetros de secuencia negativa se asumen de iguales a los de secuencia positiva. Estos parámetros, como se mencionó anteriormente, no se pueden modificar en términos de otras variables, pero la resistencia de los conductores depende de la temperatura de funcionamiento o de trabajo.

## **2.3 REPRESENTACIÓN GRÁFICA DE LOS ELEMENTOS DEL SISTEMA DE POTENCIA EN DigSILENT**

Un sistema de potencia se representa de forma general por nodos o terminales de conexión, elementos de maniobra y protección, red externa de alimentación, líneas y cargas. Las líneas y elementos de maniobra y protección se conectan a los terminales, cargas u otros mediante cubículos, uno a cada lado del elemento de conexión. En la Figura 5 se representa la conexión de los principales elementos de un sistema de potencia.

**Figura 5. Esquema representativo para la conexión de elementos en DlgSILENT.**



Fuente: [2]

## 2.4 INTERFACES EN DlgSILENT

La herramienta computacional DlgSILENT soporta un amplio conjunto de interfaces las cuales permite el intercambio de bases datos con el usuario. Las interfaces pueden ser de acuerdo a: formatos especificados por DlgSILENT (DGS, StationWare), formatos de propietarios (PSS/E, NEPLAN, ELEKTRA, MATLAB, INTEGRAL), formatos estandarizados (UCTE-DEF, CIM, OPC) y para control remoto (API, Python) [2].

DGS es una interfaz bidireccional de formato especificado por DlgSILENT la cual permite el intercambio de gran cantidad de datos con otras aplicaciones tales como el SCADA, para exportar resultados de cálculo o para el intercambio de datos con cualquier otro paquete de software. Un ejemplo de ello es importar a DlgSILENT, mediante la interfaz DGS, la base de datos e información operativa desde el SCADA. Una vez que un cálculo se ha llevado a cabo (por ejemplo, un flujo de carga o cortocircuito), los resultados se exportan nuevamente al SCADA para ser mostrados [2].

## 2.5 ESTRUCTURA DE LA INTERFAZ DGS

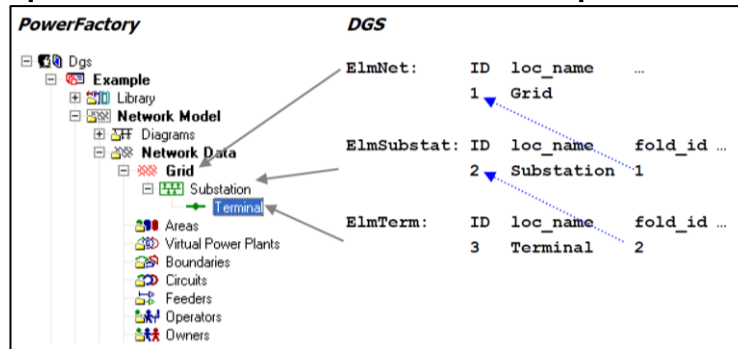
Los datos pueden ser importados y exportados mediante la interfaz DGS utilizando diferentes base de datos (*Oracle DB, Microsoft SQL, Sistema DSN*) y archivos con formato (*ASCII Text, XML, Microsoft Excel, Microsoft Access*), donde el contenido de los archivos es el mismo, pero el formato es diferente. El principio básico de la interfaz DGS es organizar todos los datos en tablas. Cada tabla tiene un nombre único y contiene una o más columnas por cada tabla [2].

Hay dos tipos de tablas: tabla general y tabla de datos de elementos. Cada archivo debe contener exactamente una tabla "*general*" y un número arbitrario de tablas de datos de elementos. Es necesario que cada tabla contenga una columna de identificación y debe llamarse "*ID*", en el caso de *Excel* la columna de identificación debe ser la primera. Además, se debe asignar un valor únicos a cada fila [4].

### 2.5.1 Jerarquía de objetos en DGS.

En DlgSILENT todos los elementos se organizan en una estructura jerárquica. Esta estructura es necesaria para las diferentes bases de datos que utiliza la interfaz DGS y se realiza mediante el atributo “*fold\_id*” [2]. Un ejemplo de jerarquía de objetos y la representación en DlgSILENT se observa en la Figura 6.

Figura 6. Jerarquía de los elementos de un sistema de potencia en DlgSILENT.



Fuente: [4]

### 2.5.2 Archivos con formato de Microsoft Excel.

La herramienta computacional *Excel* está basada en hojas de archivo. La interfaz DGS hace uso de esto, colocando una tabla en cada hoja. La hoja se denomina de acuerdo al nombre de la tabla y es colocada en cualquier secuencia ya que esto no es relevante [4].

La primera fila de cada hoja debe contener las definiciones de cada columna (cabecera): La primera columna es siempre la del “*ID*”. Para las siguientes columnas se debe especificar el nombre y el tipo de dato, por ejemplo “*loc\_name(a:40)*”. La interfaz DGS permite los siguientes tipos de datos:

- “*I*”, número entero (*integer*).
- “*r*”, número decimal con precisión de 7 dígitos (*float*).
- “*D*”, número decimal con precisión de 15 dígitos (*double*).
- “*a*”, cadena de caracteres, seguido de la cantidad de caracteres, ejemplo “*a:15*” para 15 caracteres (*string*).
- “*p*”, permite referenciar a otros elementos o registros (*pointer*).

La información detallada de la estructura en la interfaz DGS queda almacenada junto con la carpeta de instalación de DlgSILENT (C:\Program Files\DlgSILENT\PowerFactory 15\DGS\I) [4]. De acuerdo a la información disponible del circuito de distribución de energía eléctrica en la BDI y a los requerimientos de la interfaz DGS de DlgSILENT, se organiza la información en tablas, una por cada hoja de *Excel*, de la siguiente forma:

### 2.5.2.1 Hoja de Excel: construcción de la tabla general (*General*).

Normalmente, la tabla general se conforma por los elementos mostrados en la Figura 7 y se ingresan los datos para la elaboración del archivo DGS. Las columnas de la Figura 7 representan: *ID*: Identificación única para cada fila, *Descr*: describe los ajustes principales del archivo y *Val*: asigna un valor o característica a los elementos de la columna *Descr*.

Figura 7. Tabla general.

	A	B	C
1	ID(a:40)	Descr(a:40)	Val(a:40)
2		1 Version	15
3		2 Source	BDI
4		3 PostCommand1	grp/abi obj=

Fuente: Base de Datos de Instalaciones BDI de EPSA.

### 2.5.2.2 Hoja de Excel: información general de la red eléctrica (*ElmNet*, ).

En DigSILENT, la información de una red eléctrica se almacena en carpetas. Un sistema de potencia puede tener tantas redes como las definidas por el usuario, al mismo tiempo estas pueden o no estar interconectadas. Con esto se logra un análisis de varias redes como un conjunto o cada red por separado [2].

Las columnas de la Figura 8 representan: *ID*: identificación única para cada fila, *loc\_name*: nombre del red eléctrica, *owner*: propietario de la red eléctrica, *chr\_name*: nombre descriptivo del propietario y *frnom*: frecuencia nominal de la red en Hz.

Figura 8. Información de la red eléctrica.

	A	B	C	D	E
1	ID(a:40)	loc_name(a:40)	owner(a:40)	chr_name(a:40)	frnom(r)
2	4	JMD7L15RCL	JAMUNDI 115 KV 13.2 KV	RIO CLARO	60

Fuente: Base de Datos de Instalaciones BDI de EPSA.

### 2.5.2.3 Hoja de Excel: información correspondiente a los nodos de la red (*ElmTerm*, ).

Los nodos de la red de distribución hacen alusión al conjunto de elementos sobre los cuales se apoyan las líneas aéreas. El conjunto está compuesto por: postes, crucetas, herrajes y aisladores. Los elementos más visibles son los postes que pueden ser en madera, concreto o metálicos [5].

En DigSILENT, los nodos o terminales (*ElmTerm*) se utilizan para conectar generadores, líneas, cargas, etc. a una red de energía eléctrica. También pueden representar barras, uniones o nodos internos y, generalmente, en estos puntos se realizan cálculos de cortocircuito.



Las columnas de la Figura 9 representan: *ID*: identificación única para cada fila, *loc\_name*: nombre o código del objeto, en este caso indica el código asignado al poste, *fold\_id*: organiza los datos en forma jerárquica y *uknom*: Voltaje nominal línea a línea en kV.

**Figura 9. Información de terminales o nodos del circuito eléctrico.**

	A	B	C	D
1	ID(a:40)	loc_name(a:40)	fold_id(p)	uknom(r)
2	5	12652	4	13.2
3	6	29774	4	13.2
4	7	30788	4	13.2
5	⋮	⋮	⋮	⋮

Fuente: Base de Datos de Instalaciones BDI de EPSA.

#### 2.5.2.4 Hoja de Excel: información general de las líneas del circuito eléctrico (*ElmLne*, .

La conexión de cada línea se realiza punto a punto entre dos nodos. Y la representación gráfica se realiza, normalmente, mediante un diagrama unifilar. A cada lado de línea o tramo se le asigna un terminal, *i* y *j*, el cual se utiliza para realizar la conexión a los diferentes nodos. A cada línea se le asocian los parámetros eléctricos correspondientes, los cuales se dan más adelante en la hoja de *Excel TypLne* (véase el numeral 2.5.2.8)

Las columnas de la Figura 10 representan: *ID*: identificación única para cada fila, *loc\_name*: indica el nombre o código asignado al tramo entre dos nodos o postes de la red, *fold\_id*: organiza los datos en forma jerárquica, *typ\_id*: especifica las parámetros eléctricos de la línea mediante referencia a los datos de la tabla “*TypLne*”, *dline*: longitud del tramo de la línea en km y *chr\_name*: nombre descriptivo.

**Figura 10. Información de las líneas del circuito eléctrico.**

	A	B	C	D	E	F
1	ID(a:40)	loc_name(a:40)	fold_id(p)	typ_id(p)	dline(r)	chr_name(a:20)
2	2389	11019480	4	5798	0.03536	TRAMO
3	2390	11019482	4	5798	0.043408	TRAMO
4	2391	11019483	4	5798	0.046609	TRAMO
5	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮

Fuente: Base de Datos de Instalaciones BDI de EPSA.

#### 2.5.2.5 Hoja de Excel: suministro de información de los elementos de protección, maniobra y conexión en el circuito eléctrico (*ElmCoup*).

Para cumplir las funciones protección y maniobra se dispone en la línea de elementos tales como: fusibles de alta tensión, reconectores, seccionadores e interruptores. Para dar continuidad eléctrica entre algunos tramos en particular se utilizan conexiones o uniones mediante conductores (puentes). DlgSILENT emplea el modelo de un interruptor (*ElmCoup*) para representar los

elementos mencionados anteriormente, y la conexión se realiza mediante cubículos.

Las columnas de la Figura 11 representan: *ID*: identificación única para cada fila, *loc\_name*: nombre o código asignado a cada elemento, *fold\_id*: organiza los datos en forma jerárquica, *on\_off*: estado del elemento 1=cerrado, 0=abierto y *chr\_name*: nombre descriptivo, en este caso se tienen fusibles, seccionadores, interruptores y puentes.

**Figura 11. información de los elementos de protección, maniobra y conexión.**

	A	B	C	D	E
1	ID(a:40)	loc_name(a:40)	fold_id(p)	on_off(i)	chr_name(a:40)
2	6049	76042569	4	1	FUSIBLE
12	6059	81008075	4	1	SECCIONADOR
34	6081	80901709	4	1	INTERRUPTOR
35	6082	80901638	4	0	INTERRUPTOR
36	6083	80901674	4	1	INTERRUPTOR
37	6084	80901673	4	1	INTERRUPTOR
38	6085	80901729	4	1	INTERRUPTOR
39	6086	80900445	4	1	INTERRUPTOR
557	6604	84027172	4	1	PUENTES
558	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮

Fuente: Base de Datos de Instalaciones BDI de EPSA.

#### 2.5.2.6 Hoja de Excel: suministro de información de los elementos de carga (*ElmLod*, .

Las redes de distribución de energía eléctrica se pueden clasificar de acuerdo al uso final de la energía eléctrica en: cargas residenciales, comerciales, industriales, de alumbrado público y mixtas. Los transformadores se encargan de suministrar el servicio de energía a los diferentes tipos de usuarios mediante circuitos secundarios de 120/208 V, 120/240 V y en general voltajes hasta 600 V.

En DlgSILENT, las cargas (para este caso de estudio serán transformadores) conectadas a la red eléctrica, son modeladas mediante el valor de potencia aparente en Volt-Ampere y su factor de potencia

Las columnas de la Figura 12 representan: *ID*: identificación única para cada fila, *loc\_name*: nombre o código asignado a cada elemento de carga, en este caso transformadores de distribución, *fold\_id*: organiza los datos en forma jerárquica, *slini*: potencia aparente del elemento de carga en MVA, *coslini*: factor de potencia de la carga y *scale0*: indica el punto de operación de la carga mediante un factor de escala.

**Figura 12. Información de los elementos de carga.**

	A	B	C	D	E	F
1	ID(a:40)	loc_name(a:40)	fold_id(p)	slini(r)	coslini(r)	scale0(r)
2	7214	40030035	4	0.1125	0.9	0.1
3	7215	40030127	4	0.0375	0.9	0.1
4	7216	40030132	4	0.0375	0.9	0.1
5	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮

Fuente: Base de Datos de Instalaciones BDI de EPSA.

#### 2.5.2.7 Hoja de Excel: información de los elementos de compensación de potencia reactiva (*ElmShnt*).

La mayor cantidad de potencia reactiva presente en una red de distribución es de tipo inductiva. La potencia reactiva inductiva es consumida por motores, transformadores y todo tipo de dispositivos eléctricos que dispongan de una bobina para crear un campo electromagnético. La demanda de potencia reactiva de la red se reduce colocando condensadores en paralelo a los consumidores de potencia reactiva. A esta técnica se le denomina compensación [5]. Para este caso de estudio, no se cuenta con dispositivos de compensación.

Las columnas de la Figura 13 representan: *ID*: identificación única para cada fila, *loc\_name*: nombre del objeto, *fold\_id*: organiza los datos en forma jerárquica, *ushnm*: voltaje nominal en kV, *qtotn*: potencia reactiva nominal en MVar y *outserv*: estado 0=fuera de servicio, 1=en servicio. Para el circuito Río Claro 13.2 kV no se tiene compensación reactiva a dicho nivel de tensión.

**Figura 13. Elementos para compensación de potencia reactiva.**

	A	B	C	D	E	F
1	ID(a:40)	loc_name(a:40)	fold_id(p)	ushnm(r)	qtotn(r)	outserv(i)
2						

Fuente: Base de Datos de Instalaciones BDI de EPSA.

#### 2.5.2.8 Hoja de Excel: suministro de los parámetros eléctricos de las líneas del circuito (*TypLne*).

Las redes aéreas de distribución se caracterizan por utilizar conductores trenzados compuestos por varios alambres de aluminio, generalmente combinan una alta conductividad con una alta resistencia mecánica. El aluminio presenta buenas características para la conducción de la corriente eléctrica, es un material ligero y económico respecto al cobre.

La conducción de la corriente eléctrica en un conductor no se logra sin que se presenten pérdidas de energía, a este fenómeno se le conoce como resistencia eléctrica [5].

Otro fenómeno que está presente es la inductancia, *L*, producto de circular corriente variable en el tiempo que crea un flujo magnético variable. La

inductancia representa el número de enlaces de flujo del conductor por unidad de corriente. Con el valor total de inductancia del conductor y la frecuencia se determina la reactancia inductiva, la cual se da en ohms [5].

En la Figura 14 se presentan los datos necesarios para modelar una línea corta mediante parámetros de resistencia e inductancia de secuencia positiva (1), negativa (2) y cero (0) obtenidos a partir de la información suministrada por la BDI de EPSA. Las columnas de la Figura 14 representan: *ID*: identificación única para cada fila, *loc\_name*: nombre del objeto, *aohl*: cable o conductor de disposición aérea OHL, *cline*: capacitancia de secuencia 1-2 en uF/km, *cline0*: capacitancia de secuencia cero en uF/km, *nlph*: número de fases (1, 2 o 3), *nneutral*: número de conductores de neutro (0 o 1), *rline*: resistencia de secuencia 1-2 en Ohm/km a 20 °C, *rline0*: resistencia de secuencia cero en Ohm/km a 20 °C, *sline*: corriente nominal en kA, *uline*: voltaje nominal en kV, *xline*: reactancia de secuencia 1-2 en Ohm/km, *xline0*: reactancia de secuencia cero en Ohm/km, *frnom*: frecuencia nominal en Hz y *tmax*: temperatura máxima de trabajo.

**Figura 14. Parámetros técnicos y eléctricos de los conductores del circuito.**

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O
1	ID(a:40)	loc_name(a:40)	aohl (a:3)	cline(r)	cline0(r)	nlph(i)	nneutral(i)	rline(r)	rline0(r)	sline(r)	uline(r)	xline(r)	xline0(r)	frnom(r)	tmax(r)
2	7565	1/0 ACSR	ohl	0	0	3	0	0.7005	0.87348	0.221	13.2	0.5759	1.98207	60	80
3	7566	1/0 ACSR ECOL	cab	0	0	3	0	0.7005	0.87348	0.221	13.2	0.5759	1.98207	60	80
8	7571	1/0 Cu Aislado-1	ohl	0	0	3	0	0.7005	0.87348	0.221	13.2	0.5759	1.98207	60	80
11	7574	2 ACSR	ohl	0	0	3	0	1.0304	1.20331	0.17	13.2	0.5129	1.99741	60	80
15	7578	2 Cu Aislado-15k	ohl	0	0	3	0	1.0304	1.20331	0.17	13.2	0.5129	1.99741	60	80
17	7580	2 XLPE	ohl	0	0	3	0	0.5903	0.76329	0.219	13.2	0.512	1.99657	60	80
18	7581	2/0 ACSR	ohl	0	0	3	0	0.5609	0.73389	0.253	13.2	0.4952	1.97977	60	80
29	7592	4 ACSR	ohl	0	0	3	0	1.5802	1.75319	0.128	13.2	0.5303	1.96051	60	80
30	7593	4 Cu Desnudo	ohl	0	0	3	0	0.9301	1.10267	0.162	13.2	0.5336	1.94056	60	80
31	7594	4/0 ACSR	ohl	0	0	3	0	0.371	0.54395	0.323	13.2	0.5497	1.95591	60	80
32	7595	4/0 ACSR ECOL	ohl	0	0	3	0	0.371	0.54395	0.323	13.2	0.5497	1.95591	60	80
40	7603	500 MCM Mono	ohl	0	0	3	0	0.1142	0.28659	0.576	13.2	0.5087	1.83725	60	80
42	7605	6 ACSR	ohl	0	0	3	0	2.4701	2.64311	0.097	13.2	0.4939	1.96051	60	80
44	7607	8 Cu Desnudo	ohl	0	0	3	0	1.4901	1.66251	0.087	13.2	0.4971	1.94056	60	80
45	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:

Fuente: Base de Datos de Instalaciones BDI de EPSA

#### 2.5.2.9 Hoja de Excel: información de la red externa de alimentación del circuito (*ElmXnet*).

El modelado de la red externa de alimentación del circuito en estudio para estado estacionario en DIgSILENT, se representa mediante una fuente de voltaje y una impedancia en serie. Los parámetros de entrada para el modelo de una red externa de alimentación se pueden consultar en [6].

En la Figura 15 se representan los parámetros necesarios para el modelado de la red externa, los cuales son: *ID*: identificación única para cada fila, *loc\_name*: nombre del objeto, *fold\_id*: organiza los datos en forma jerárquica, *snss*: potencia máxima de cortocircuito en MVA, *snssmin*: potencia mínima de cortocircuito en MVA, *ikss*: corriente máxima de cortocircuito en kA (*Ik"max*), *rntxn*: relación máxima de R/X, *ikssmin*: corriente mínima de cortocircuito en kA (*Ik"min*) y *rntxnmin*: relación mínima de R/X

**Figura 15. Datos de la red externa de alimentación.**

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1	ID(a:40)	loc_name(a:40)	fold_id(p)	snss(i)	snssmin(i)	ikss(r)	rntxn(r)	ikssmin(r)	rntxnmin(r)
2	7628	JAMUNDI 115 KV	4	219.78	219.08	9.613	0.1361	9.582242	0.0937

Fuente: Base de Datos de Instalaciones BDI de EPSA.

#### 2.5.2.10 Hoja de Excel: interconexión de líneas y nodos del circuito (*StaCubic*).

Hasta el momento se ha planteado individualmente cada elemento del circuito eléctrico de distribución, por lo tanto es necesario realizar la conexión de cada componente tal como están dispuestos físicamente. Estos elementos pueden ser: líneas, cargas, elementos de maniobra y protección u otros, y se conecta uno de sus extremos a un terminal o nodo. La conexión física de cada elemento se obtiene de la BDI de EPSA.

Las columnas de la Figura 16 representan: *ID*: identificación única para cada fila, *fold\_id*: organiza los datos en forma jerárquica, *obj\_id*: conecta una línea, un elemento de maniobra o protección o una carga con un nodo o terminal y *obj\_bus(i)*: lado de conexión 0=cubículo *i*, 1= cubículo *j* (véase la Figura 5).

**Figura 16. Conexión de líneas a los terminales o nodos del circuito eléctrico.**

	A	B	C	D
1	ID(a:40)	fold_id(p)	obj_id(p)	obj_bus(i)
2	7629	2647	7628	0
3	7630	2456	3611	0
4	7631	2449	3611	1
5	7632	2690	3612	0
6	⋮	⋮	⋮	⋮

Fuente: Base de Datos de Instalaciones BDI de EPSA.

#### 2.5.2.11 Hoja de Excel: parámetros para representar el circuito eléctrico mediante un diagrama unifilar (*IntGrfnet*, ).

Un diagrama unifilar se utiliza para representar un conjunto de elementos, tales como conductores de un circuito, elementos de maniobra y protección, circuitos alimentadores, cargas, entre otros, mediante una única línea. En DigSILENT se ingresa la configuración inicial para representar el circuito en un diagrama unifilar, el cual almacena la información de los parámetros eléctricos de la red en un objeto gráfico.

Las columnas de la Figura 17 representan: *ID*: identificación única para cada fila, *loc\_name*: nombre del circuito a representar, *snap\_on*: mostrar herramientas en el diagrama para ajuste de parámetros del circuito 0=no, 1=si y *ortho\_on*: conexión ortogonal de segmentos de líneas 0=no, 1=si.

**Figura 17. Ajustes para representar el circuito eléctrico en un diagrama unifilar.**

	A	B	C	D
1	ID(a:40)	loc_name(a:40)	snap_on(i)	ortho_on(i)
2	15186	RIO CLARO 13,2 kV	0	0

Fuente: Base de Datos de Instalaciones BDI de EPSA.

#### 2.5.2.12 Hoja de Excel: coordenadas espaciales para representar los elementos del circuito eléctrico en DlgSILENT (*IntGrf*).

En la Base de Datos de Instalaciones, BDI, se dispone de la ubicación de los postes o nodos del circuito mediante coordenadas geográficas. Para visualizar el circuito tal como se dispone físicamente, la herramienta computacional DlgSILENT dispone de un arreglo para ingresar las coordenadas geográficas del circuito convertidas en valores de *X* e *Y* de la ventana del editor gráfico.

Las columnas de la Figura 18 representan: *ID*: identificación única para cada fila, *sSymNam*: nombre del elemento representado en la ventana del editor gráfico, *pDataObj*: ID del objeto (nodo o terminal) a ubicar en la ventana del editor gráfico, *rCenterX*: posición del objeto en la coordenada *X*, *rCenterY*: posición del objeto en la coordenada *Y* y *fold\_id*: organiza los datos en forma jerárquica.

**Figura 18. Ubicación espacial de los elementos del sistema potencia en la ventana del editor gráfico de DlgSILENT.**

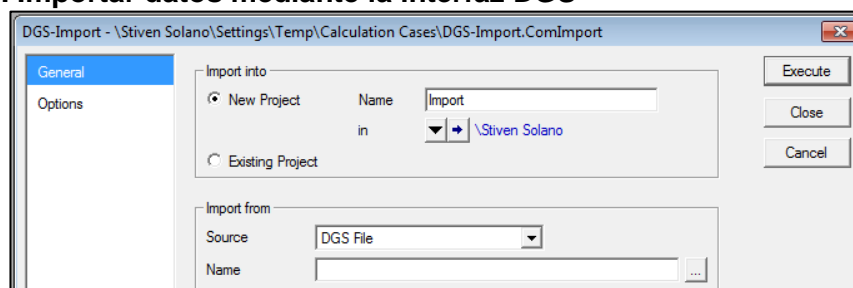
	A	B	C	D	E	F
1	ID(a:40)	sSymNam(a:9)	pDataObj(p)	rCenterX(r)	rCenterY(r)	fold_id(p)
2	15187	PointTerm	5	410.9861	757.6188	15186
3	15188	PointTerm	6	388.0861	1423.1813	15186
4	15189	PointTerm	7	704.6736	1637.0625	15186
5	...	...	...	...	...	...

Fuente: Base de Datos de Instalaciones BDI de EPSA.


## 2.6 IMPORTAR Y REPRESENTAR LOS PARÁMETROS ELÉCTRICOS DEL CIRCUITO MEDIANTE LA INTERFAZ DGS DE DlgSILENT


El procedimiento general para importar datos mediante la interfaz DGS se realiza desde el menú principal de DlgSILENT: *File* → *Import* → *DGS Format...* en la Figura 19 se ilustra la ventana que se despliega para importar datos.

**Figura 19. Importar datos mediante la interfaz DGS**



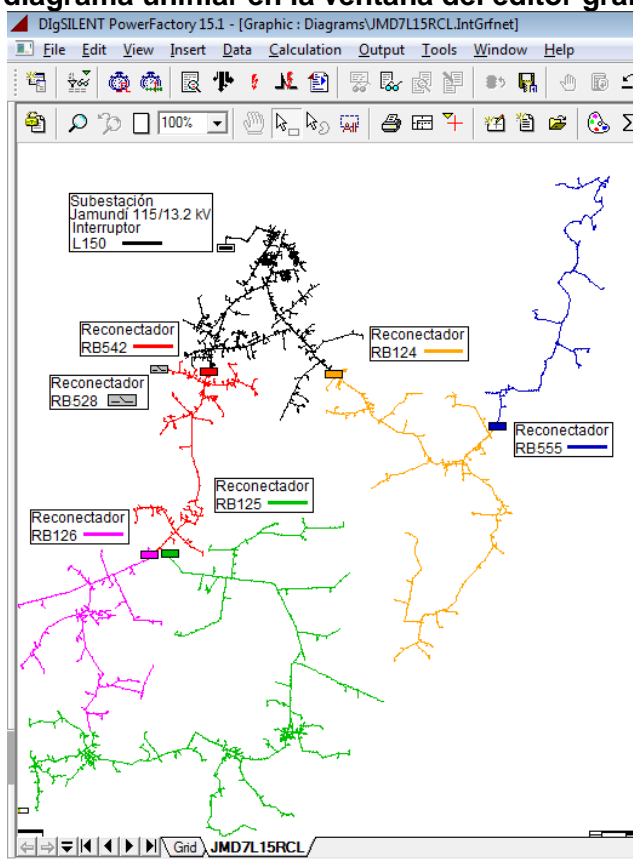
Fuente: Herramienta computacional DlgSILENT.

En el campo importar en (*import into*) existe la posibilidad de importar datos: creando un nuevo proyecto (*new project*) o sobre un proyecto ya existente (*existing project*), además seleccionar la ubicación del archivo dentro del usuario en DlgSILENT mediante el botón . En este caso se selecciona *new Project*. Para el campo importar desde (*import from*) la fuente es *DGS file* y en nombre (*name*) se selecciona la ubicación del archivo en formato *Microsoft Excel File*. Finalmente se da clic sobre la opción *Execute*.

Para observar el modelo implementado del circuito de distribución en la ventana del editor gráfico y realizar las diferentes simulaciones (flujo de potencia, cortocircuito, entre otras) se siguen los siguientes pasos desde la barra de menú: *File* → *Activate Project...* y en el nombre del proyecto () se da clic derecho y activar (*activate*).

DlgSILENT representa los elementos de un sistema de potencia descritos en el numeral 2.5.2 mediante un diagrama unifilar simplificado, este se construye mediante los elementos mostrados en la Figura 5. Finalmente, en la Figura 20 se ilustra la implementación de los parámetros eléctricos del circuito Río Claro 13.2 kV en DlgSILENT.

**Figura 20. Representación de los parámetros eléctricos del circuito Río Claro 13.2 kV mediante diagrama unifilar en la ventana del editor gráfico de DlgSILENT.**



Fuente: Elaboración propia a partir de la herramienta computacional DlgSILENT.

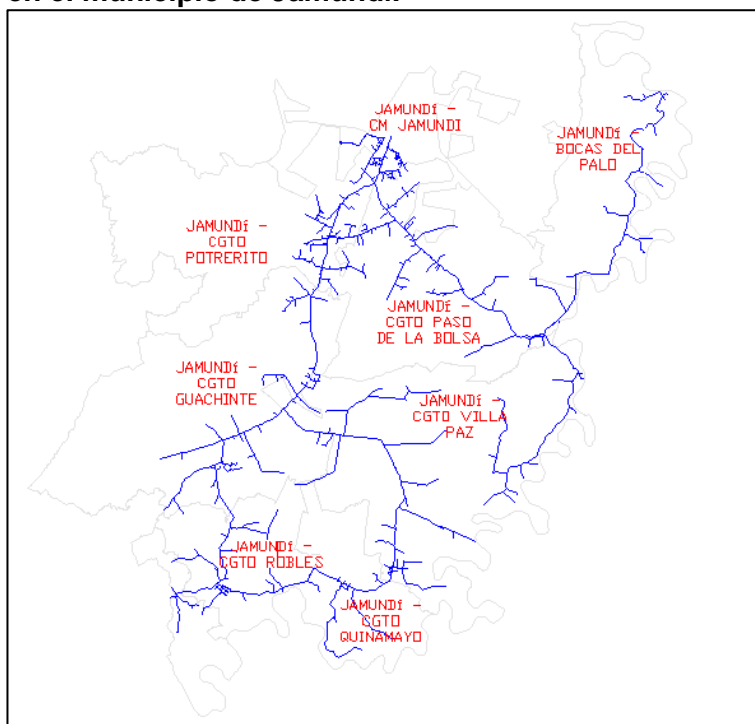


En la Figura 20 se representa la ubicación física de los elementos de protección y mediante colores se define la incidencia que estos tiene en los ramales del circuito Río Claro 13.2 kV. Por ejemplo, el interruptor L150 ubicado en la cabecera del circuito (subestación Jamundí 115/13.2 kV) es la protección principal de todo el circuito, mientras que el reconectador RB124 es protección de un ramal y respaldo del reconectador del RB555. La codificación del interruptor y de los reconectores (L150, RB126, etc) se toma de acuerdo a la Base de Datos de Instalaciones, BDI, de EPSA.

El reconectador RB528 está ubicado en la frontera entre el circuito Río Claro 13.2 kV y el circuito Jamundí 2 de 13.2 kV, ambos de propiedad de EPSA, permaneciendo normalmente abierto y solo bajo condiciones especiales es cerrado para dar suministro de energía eléctrica de un circuito distribución al otro circuito.

En la Figura 21 se ilustra el plano cartográfico con la ubicación geográfica del circuito Río Claro 13.2 kV en un diagrama unifilar simplificado y los corregimientos de influencia en el municipio de Jamundí. En este plano se puede observar la relación grafica que existe con la Figura 20, en la cual se representó el circuito eléctrico implementado en DlgSILENT mediante la interfaz DGS.

**Figura 21. Plano cartográfico del circuito Río Claro 13.2 kV en los corregimientos de influencia en el municipio de Jamundí.**



Fuente: Planos cartográficos EPSA

Este plano es generado por la empresa EPSA, sin escala y se ajusta a las necesidades específicas para la gestión de los activos de la empresa.



### 3 METODOLOGÍA PARA LA UBICACIÓN DE FALLAS

#### 3.1 INTRODUCCIÓN

La continuidad en el suministro de energía eléctrica en un circuito de distribución se puede afectar por diversas circunstancias, entre las principales causas se encuentra la ocurrencia de fallas entre las fases de un circuito o entre fases y tierra. El restablecimiento del suministro de energía depende directamente de la oportuna ubicación del punto de falla y la reparación del circuito en falla.

Una de las metodologías más rudimentarias para la ubicación del punto de falla en sistemas de distribución de energía eléctrica consiste en la inspección visual a lo largo del circuito. Este método consume mucho tiempo en la ubicación del punto de falla debido a la extensión y a la topología radial de los circuitos de distribución. Usualmente, este método se complementa con el uso de equipos detectores de paso de corriente de falla, ubicados estratégicamente sobre el circuito y de los reportes de fallas por parte de los clientes mediante llamadas telefónicas. Las consideraciones anteriores hacen que este método sea económicamente costoso y su eficiencia sea baja [7].

Otra metodología para la ubicación de fallas en sistemas de distribución consiste en Métodos Basados en el Modelo MBM, los cuales utilizan los parámetros eléctricos del sistema de distribución y la medida de tensión y corriente en la cabecera del circuito, en prefalla y durante falla para estimar la impedancia equivalente desde el punto de medición hasta el punto de la falla [7].

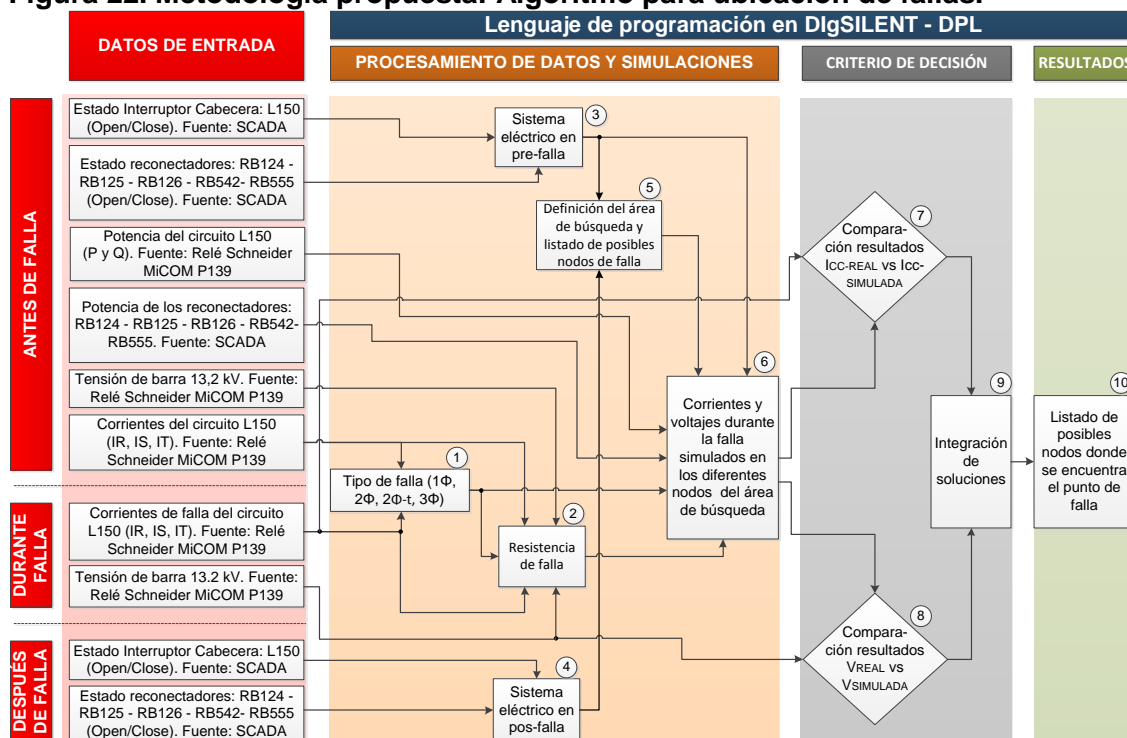
La topología altamente ramificada y la presencia de cargas intermedias hacen que los Métodos Basados en el Modelo, MBM, puede presentar una múltiple estimación del punto de falla. Además, la exactitud en la estimación de los posibles puntos de falla es altamente dependiente de un buen modelado del sistema de distribución mediante parámetros eléctricos.

Para la obtención de los posibles nodos de falla en un circuito de distribución de energía eléctrica se emplea la metodología propuesta en el trabajo de grado de maestría del ing. Wilman J. Pisso T. [8], la cual hace uso de los Métodos Basados en el Modelo, MBM, y tiene en cuenta los estados *on/off* de los elementos de protección telegestionados ubicados estratégicamente a lo largo del circuito de distribución [1], [7], [9] y [10].

## 3.2 DESARROLLO DE LA METODOLOGÍA PARA LA UBICACIÓN DE FALLAS

A continuación se presenta la metodología propuesta en el trabajo de grado del ing. Wilman J. Pisso T., la cual se desarrolla mediante un algoritmo de ubicación de fallas en sistemas de distribución de energía eléctrica.

**Figura 22. Metodología propuesta: Algoritmo para ubicación de fallas.**



Fuente: [8].

### 3.2.1 Datos de entrada

Los datos de entrada son obtenidos desde el sistema SCADA y del relé de protección, L150, ubicado en la cabecera del circuito de distribución. Estos datos se definen de la siguiente manera

#### - Estado lógico de los elementos de corte en prefalla y posfalla

Señales binarias del estado del interruptor y los re conectadores ubicados a lo largo del circuito de distribución en el estado de prefalla y posfalla. Las señales son enviadas desde los elementos de corte hasta el sistema SCADA de EPSA.

#### - Magnitud de potencia activa y potencia reactiva en prefalla medida en los re conectadores

Valor RMS promedio en periodos de 15 minutos registrado por los re conectadores del circuito: RB125, RB126, RB542 y RB555. Estos datos son enviados y almacenados en el sistema SCADA de EPSA.

#### **- Magnitud y ángulo de la tensión y la corriente en prefalla y durante falla.**

Para obtener esta información se hace uso de los oscilogramas de tensión y corriente en prefalla y durante falla almacenados en el relé de protección ubicado en la subestación o cabecera del circuito de distribución de energía eléctrica. Estos oscilogramas son descargados desde el relé de protección, posterior a la ocurrencia de la falla. Para determinar el valor RMS con sus respectivos ángulos (fasores) de la tensión fase-tierra y la corriente por fase se hace uso del programa computacional SIGRA 4.5 de la compañía SIEMENS.

Los fasores de prefalla son calculados un ciclo antes de la ocurrencia de la falla y los datos durante falla son obtenidos tres ciclos después de la detección de la falla, esto con el fin de minimizar el efecto de la corriente *infeed*, [9], ya que el transformador de potencia que alimenta el circuito Río Claro alimenta un total de cinco circuitos de distribución (véase la Figura 2).

#### **- Magnitud de potencia activa y potencia reactiva en prefalla medida en la cabecera del circuito**

A partir de los valores RMS y el valor del ángulo de fase de la tensión fase-tierra y de la corriente por fase, determinados anteriormente, se calcula el valor RMS de potencia activa y potencia reactiva suministrada al circuito de distribución de energía eléctrica.

### **3.2.2 Lenguaje de programación en DlgSILENT - DPL -**

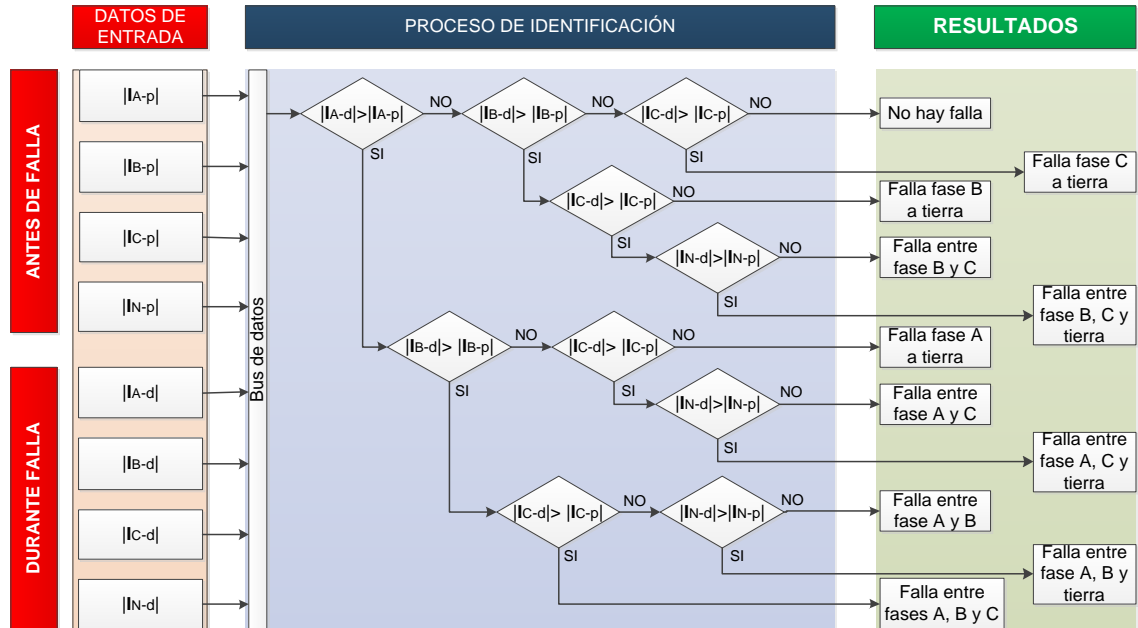
En este módulo se ingresan los **datos de entrada** para determinar: el tipo de falla, la resistencia de falla, el estado en del circuito en prefalla y posfalla mediante programación en el módulo DPL. Posteriormente, se realizan las diferentes simulaciones de cortocircuito y mediante un criterio de decisión se determina un listado de posibles nodos donde se encuentra el punto de falla.

#### **- Tipo de falla (bloque 1)**

La corriente por línea durante una falla contiene la componente de carga y la componente de falla. Si el valor de la corriente durante falla de una o más fases es mayor al valor de corriente en prefalla se asume que ha ocurrido una falla, además si la magnitud de la corriente por el conductor de neutro durante falla es mayor a la corriente en prefalla, se asume que una o dos fases se encuentran en cortocircuito con tierra [7].

A continuación se presenta un algoritmo que representa una secuencia llevada a cabo para determinar las fases en falla y el tipo de falla que ha ocurrido en el circuito de distribución a partir de los valores RMS de corriente en prefalla y durante falla.

**Figura 23. Algoritmo para la identificación del tipo de falla y las fases involucradas**



Fuente: [9]

Siendo:

$|I_{A-p}|$  = Corriente RMS de la fase "A" medida en prefalla.

$|I_{B-p}|$  = Corriente RMS de la fase "B" medida en prefalla.

$|I_{C-p}|$  = Corriente RMS de la fase "C" medida en prefalla.

$|I_{N-p}|$  = Corriente RMS por el conductor de neutro "N" del transformador de potencia medida en prefalla.

$|I_{A-d}|$  = Corriente RMS de estado estable de la fase "A" medida durante falla.

$|I_{B-d}|$  = Corriente RMS de estado estable de la fase "B" medida durante falla.

$|I_{C-d}|$  = Corriente RMS de estado estable de la fase "C" medida durante falla.

$|I_{N-d}|$  = Corriente RMS de estado estable por el conductor de neutro "N" del transformador de potencia medida durante falla.

Los resultados obtenidos en algoritmo para la identificación del tipo de falla de la Figura 23 son acordes con los tipos de falla que pueden ser simulados mediante el módulo de cortocircuito de DIgSILENT (véase el numeral 4.3.4.1), los cuales son:

- Cortocircuito trifásico.
- Cortocircuito línea a línea.
- Cortocircuito doble línea a tierra.
- Cortocircuito monofásico a tierra.

## **- Resistencia de falla (bloque 2)**

A este bloque ingresa el valor RMS con el respectivo ángulo de tensión fase-tierra y la corriente por cada fase, en el estado de prefalla y durante falla. Además, desde el bloque 1 ingresa el tipo de falla que ha ocurrido en el sistema de distribución de energía eléctrica.

Dependiendo del tipo de falla que ha ocurrido en el circuito de distribución (de acuerdo a la salida del bloque 1) se determina la resistencia asociada a cada tipo de falla.

En este trabajo de grado se considera solo la parte real de la impedancia de falla, ya que en la mayoría de fallas que ocurren en un sistema de distribución de energía eléctrica son debidas a elementos que se comportan como resistencias eléctricas ante la circulación de corriente a través de ellos [7] y [10]. Las principales causas de fallas eléctricas se dan por: contacto entre la vegetación y los conductores del circuito, contactos provocados por animales, unión entre fases causada por la operación de maquinaria agrícola, entre otras.

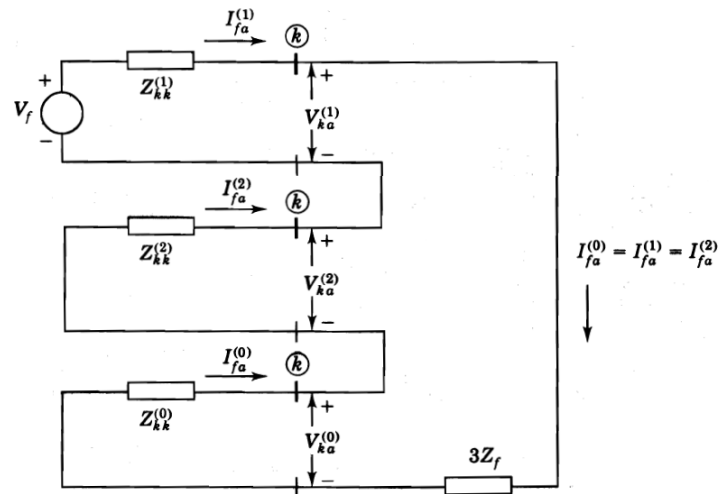
La determinación de la resistencia de falla se realiza de la siguiente forma:

### **• Para el caso de fallas monofásicas a tierra se siguen los siguientes pasos:**

- 1) Se utilizan los fasores medidos en prefalla y durante falla en la cabecera del circuito de la corriente por el conductor del neutro y la tensión de la fase involucrada en la falla (datos tomados del relé de protección).
- 2) Mediante ley de Ohm se determina la impedancia vista desde la subestación o cabecera del circuito de distribución, la cual incluye la resistencia de falla y las impedancias de secuencia positiva, negativa y cero involucradas en el trayecto de la corriente de falla.
- 3) Mediante la herramienta computacional DIgSILENT, se determina la impedancia de secuencia positiva, negativa y cero desde la cabecera del circuito hasta el nodo donde se realizará la simulación de la falla monofásica a tierra. Para lo anterior, se utiliza el modelo eléctrico del circuito de distribución implementado a partir de parámetros de secuencia.
- 4) Se hace la diferencia entre la impedancia vista desde la cabecera del circuito y la impedancia desde la cabecera del circuito hasta un determinado nodo, la cual es calculada en el paso anterior. De esta diferencia solo se toma la parte real de la impedancia, la cual corresponde a la resistencia de falla.

En la Figura 24 se muestra la conexión de las tres redes de secuencia para el caso de fallas monofásicas a tierra a través de una impedancia de falla.

**Figura 24. Conexión de las redes de secuencia para simular una falla monofásica de la fase  $a$  en el nodo  $k$**



Fuente: [1]

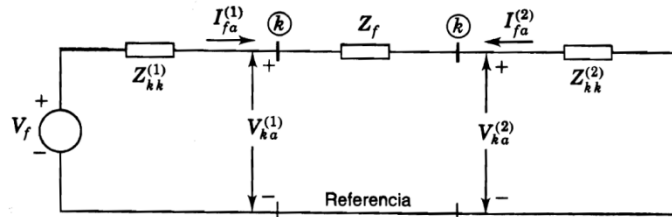
• **Para el caso de fallas línea a línea se siguen los siguientes pasos:**

- 1) Se utilizan los fasores medidos en prefalla y durante falla en la cabecera del circuito de la corriente por las dos fases y la tensión fase-tierra de las líneas involucrada en la falla (datos tomados del relé de protección).
- 2) Se asume que la impedancia de carga por cada conductor de fase no presenta cambios en el estado de prefalla y durante falla. Teniendo en cuenta la consideración anterior, mediante ley de Ohm se determina la impedancia de carga por cada fase, esto con el fin de separar la corriente de falla de la corriente de carga.
- 3) Mediante ley de Ohm, se calcula la corriente de carga por cada fase a partir del valor de la impedancia de carga, calculada en el paso anterior, y la tensión de fase durante falla.
- 4) Se hace la diferencia entre la corriente durante falla registrada en el relé de protección ubicado en la cabecera del circuito y la corriente de carga calculada en el paso anterior.
- 5) Mediante ley de Ohm, se calcula la impedancia de falla vista desde la cabecera del circuito a partir de la tensión fase-fase durante falla y la corriente calculada en el paso anterior.
- 6) Mediante la herramienta computacional DIgSILENT, se determina la impedancia de secuencia positiva y negativa desde la cabecera del circuito hasta el nodo donde se realizará la simulación de la falla línea a línea. Para lo anterior se utiliza el modelo eléctrico del circuito de distribución implementado a partir de parámetros de secuencia.

- 7) Se calcula la diferencia entre la impedancia vista desde la cabecera del circuito y la impedancia desde la cabecera del circuito hasta un determinado nodo, calculada en el paso anterior. De esta diferencia solo se toma la parte real de la impedancia, la cual corresponde a la resistencia de falla.

En la Figura 25 se muestra la conexión de las redes de secuencia para el cálculo de una falla línea a línea a través de una impedancia de falla.

**Figura 25. Conexión de las redes de secuencia positiva y negativa para una falla línea a línea en el nodo  $k$**



Fuente: [1]

• **Para el caso de fallas trifásicas se siguen los siguientes pasos:**

- 1) Se utilizan los fasores medidos en prefalla y durante falla en la cabecera del circuito de la corriente por las fases y la tensión fase-tierra de las tres líneas involucrada en la falla (datos tomados del relé de protección).
- 2) Se asume que la impedancia de carga por cada conductor de fase no presenta cambios en el estado de prefalla y durante falla. Teniendo en cuenta la consideración anterior, mediante ley de Ohm se determina la impedancia de carga por cada fase, esto con el fin de separar la corriente de falla de la corriente de carga.
- 3) Mediante ley de Ohm, se calcula la corriente de carga por cada fase a partir del valor de la impedancia de carga, calculada en el paso anterior, y la tensión de fase durante falla.
- 4) Se hace la diferencia entre la corriente durante falla registrada en el relé de protección ubicado en la cabecera del circuito y la corriente de carga calculada en el paso anterior.
- 5) Mediante ley de Ohm, se calcula la impedancia de falla vista desde la cabecera del circuito a partir de la tensión fase-tierra durante falla y la corriente calculada en el paso anterior.
- 6) Mediante la herramienta computacional DiGSILENT, se determina la impedancia de secuencia positiva desde la cabecera del circuito hasta el nodo donde se realizará la simulación de la falla trifásica. Para lo anterior se utiliza el modelo eléctrico del circuito de distribución implementado a partir de parámetros de secuencia.

- 7) Se calcula la diferencia entre la impedancia vista desde la cabecera del circuito y la impedancia desde la cabecera del circuito hasta un determinado nodo, la cual es calculada en el paso anterior. De esta diferencia solo se toma la parte real de la impedancia, la cual corresponde a la resistencia de falla.

Los pasos mencionados anteriormente, para determinar la resistencia de falla asociada a los diferentes tipos de cortocircuito, se realizan iterativamente para cada nodo donde se desee realizar la simulación de cortocircuito en la herramienta computacional DIgSILENT.

#### **- Sistema eléctrico en prefalla (bloque 3)**

En este bloque se determina la topología del circuito antes de falla mediante el estado, *on/off*, de los reconectores ubicados a lo largo del circuito. Por tratarse de un circuito con topología radial, el estado *off* de un reconector indica que el circuito aguas abajo de la ubicación de este elemento, se encuentra sin suministro de energía eléctrica y ocurre lo contrario si el estado de un reconector es *on*, a excepción que aguas arriba de este se encuentre un reconector en estado *off*.

El estado, *on/off*, de los reconectores es obtenido fuera de línea desde el sistema SCADA (**datos de entrada**) y se ingresan mediante programación al modelo implementado de los reconectores en DIgSILENT, para luego simular un flujo de potencia y determinar condiciones de sistema en prefalla.

#### **- Sistema eléctrico en posfalla (bloque 4)**

En este bloque se determina la topología del circuito a partir del estado de los reconectores después de presentarse una falla. La obtención del estado de los reconectores (**datos de entrada**) y el ingreso de los parámetros al modelo implementado en DIgSILENT se realiza de manera análoga a lo descrito para el sistema eléctrico en prefalla.

#### **- Definir el área de búsqueda y listado de posibles nodos de falla (bloque 5)**

A este bloque le ingresa la información de topología del sistema prefalla (salida bloque 3) y la topología del sistema en posfalla (salida del bloque 4). Con esta información se realiza la comparación entre las dos topologías, revisando si cambiaron los estados de los reconectores ubicados a lo largo del circuito de distribución, de esta forma se encuentra el área del sistema que quedo desconectada ante la operación de un equipo de protección y se listan los nodos que se encuentran dentro de dicha área.

Con este procedimiento se logra reducir el universo de búsqueda, estableciendo de forma directa una reducción en el tiempo en el recurso computacional para la etapa de búsqueda.



**- Corrientes y voltajes durante la falla simulados en los diferentes nodos del área de búsqueda (bloque 6).**

A este bloque ingresan los parámetros obtenidos desde los bloques 1, 2, 3 y 5. Además, ingresan directamente desde los **datos de entrada** la potencia activa y la potencia reactiva medida en la cabecera del circuito (L150) y en los diferentes reconfiguradores ubicados a lo largo del circuito (RB125, RB126, RB542 y RB555).

Con la información anterior se logra determinar topología y magnitud de la tensión en los diferentes nodos del circuito de distribución de energía eléctrica. Este último se determina mediante la simulación de un flujo de potencia (estado de prefalla).

Finalmente, se realizan las simulaciones de cortocircuito en los posibles nodos ubicados dentro del área de búsqueda de la falla.

**- Comparación de resultados de cortocircuito:  $V_{REAL}$  vs  $V_{SIMULADA}$  e  $I_{CC-REAL}$  vs  $I_{CC-SIMULADA}$  (bloque 7 y 8)**

En estos bloques se comparan los datos reales de voltaje y corriente de cortocircuito versus un listado de nodos con el valor de corriente y de voltaje simulado durante falla. Los valores reales de corriente y voltaje son obtenidos en el relé de la subestación (asociado al relé de protección L150) y los valores simulados son vistos desde el alimentador del circuito (cabecera del circuito) al simular cortocircuitos en los nodos ubicados dentro del área de búsqueda.

La comparación de voltajes y corrientes durante falla es realizada por separado y son filtrados o tenidos en cuenta aquellos puntos de falla que cumplan con un error relativo porcentual por debajo del 1% y 5% para el voltaje y la corriente, respectivamente. A continuación se presenta en la ecuación (1) el cálculo de este error.

$$e_r\% = \frac{|valor\ real - valor\ de\ simulación|}{valor\ real} \times 100\% \quad (1)$$

**- Integración de soluciones (bloque 9)**

A partir de los bloques 7 y 8 se obtienen los posibles nodos de falla que cumplen con el criterio del 1% y 5% de error relativo porcentual tanto en tensión como en corriente de cortocircuito, respectivamente. Posteriormente se intersectan los dos conjuntos de datos y se establece como la salida de este bloque todos aquellos nodos que cumplan simultáneamente con un error relativo porcentual menor al establecido tanto en voltaje como en corriente.

#### **- Listado de posibles nodos donde se encuentra la falla (bloque 10)**

Mediante el desarrollo de la metodología se presenta al final un listado de nodos que acotan el área de búsqueda donde se debe encontrar el punto real de ocurrencia de la falla.

### **3.3 IMPLANTACIÓN DE LA METODOLOGÍA PARA LA UBICACIÓN DE FALLAS**

Para la validación del modelo implementado en DlgSILENT mediante el módulo de cortocircuito (véase el numeral 4.3) se emplea parte de la metodología para la ubicación de fallas [8], este es el caso de los **datos de entrada** y los pasos a seguir para determinar la resistencia de falla (bloque 2).

En el capítulo 5 se utiliza la metodología para la ubicación de fallas [8], con lo cual se logre obtener de forma automática la base de datos con la información de voltaje y corriente para todos los posibles nodos de falla. Además, varios de los bloques que se plantean realizar de forma automática en la metodología, (véase la Figura 22), serán desarrollados de forma manual.

La implementación completa de la metodología para la ubicación de fallas se realizará en el trabajo de grado del Ing. Wilman J. Pisso T., quien tiene como objetivo principal: desarrollar una aplicación que permita identificar el punto de falla en un circuito de 13.2 KV utilizando la información de los elementos de protección telegestionados. Caso: Circuito Río Claro de la red de distribución de EPSA.

## **4 VALIDACIÓN DEL MODELO IMPLEMENTADO EN DIgSILENT DEL CIRCUITO RÍO CLARO 13.2 kV**

### **4.1 INTRODUCCIÓN**

Para la validación de modelo eléctrico del circuito Río Claro 13.2 kV, implementado en el capítulo 2, se plantean dos formas mediante simulaciones: flujo de potencia y cortocircuito.

Para las simulaciones de flujo de potencia en DIgSILENT se requieren conocer el valor de las siguientes variables, los cuales fueron obtenidos mediante el sistema SCADA de EPSA en la cabecera y en los reconectadores del circuito: potencia activa, potencia reactiva y voltaje. Además es necesario conocer la topología del sistema mediante el estado de los reconectadores (on/off). Finalmente, se comparan los datos reales versus los datos simulados y el modelo será validado si el error relativo porcentual es menor al 5%.

En el caso de simulaciones de cortocircuito es necesario conocer el valor de las siguientes variables, obtenidas desde el sistema SCADA y del relé asociado interruptor (L150) ubicado en la cabecera del circuito: topología de prefalla del sistema mediante el estado de los reconectadores, potencia activa y reactiva en la cabecera del circuito y en los reconectadores del circuito, tipo y lugar de la falla y magnitud de la corriente de cortocircuito registrada en relé asociado interruptor cabecera.

### **4.2 VALIDACIÓN DEL MODELO IMPLEMENTADO MEDIANTE EL MÓDULO DE FLUJO DE POTENCIA DE DIgSILENT**

Para validar el circuito Río Claro implementado en la herramienta computacional DIgSILENT se realizaron simulaciones de flujo de potencia en DIgSILENT partiendo de los valores reales de potencia activa y reactiva medida en la cabecera del circuito (subestación Jamundí 115 kV ) y en los reconectadores ubicados sobre la trayectoria del circuito de distribución Río Claro 13.2 kV.

En la cabecera del circuito Río Claro 13.2 kV (subestación Jamundí 115 kV) se dispone de datos medidos de tensión, potencia activa y potencia reactiva demandada por todas las cargas que son alimentadas por este circuito. En los reconectadores (de acuerdo a la BDI: RB125, RB126, RB555 y RB542) ubicados a lo largo del circuito entregan datos medidos de potencia activa y potencia reactiva. Los datos anteriores son enviados hacia el sistema SCADA de EPSA, desde donde son obtenidos para realizar las simulaciones de flujo de potencia del circuito Río Claro 13.2 kV en DIgSILENT.

#### 4.2.1 Carga máxima y mínima del circuito Río Claro 13.2 kV.

Los sistemas de distribución pueden atender usuarios industriales, comerciales, residenciales o mixtos. Para el caso de estudio, el circuito atiende principalmente usuarios residenciales ubicados en sectores urbanos y rurales.

A partir de la potencia activa y potencia reactiva consumida por los usuarios en un intervalo de tiempo, para este caso 1 hora, se logra determinar la carga o demanda del circuito. La variación de la carga en un periodo de 24 horas da origen a las curvas de carga diaria. Al tratarse de usuarios predominantemente residenciales, esta curva típicamente presenta dos picos de carga, uno hacia el mediodía y otro en la noche [5].

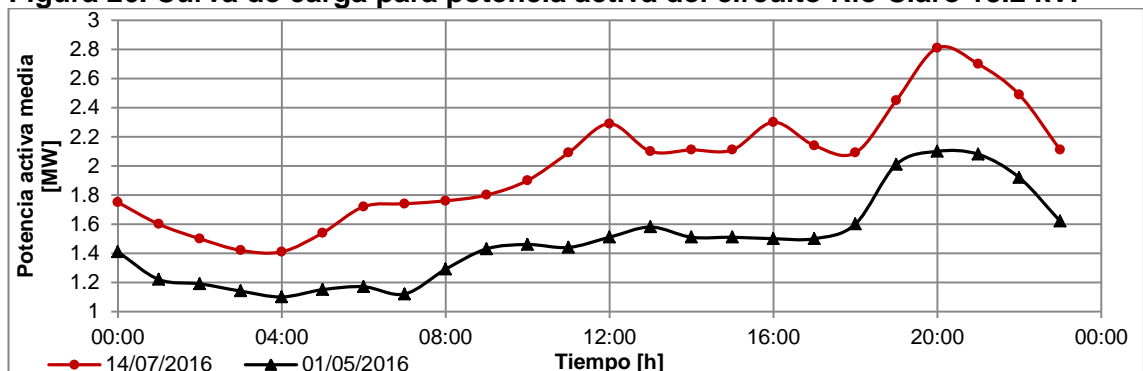
Según las definiciones de la resolución CREG 011 de 2009, los periodos en los cuales se puede presentar la carga máxima, media y mínima son los siguientes:

- *Periodo de carga máxima:* Corresponde a las horas comprendidas entre las 9:00 y las 12:00 horas y entre las 18:00 y las 21:00 horas del día.
- *Periodo de Carga Media:* Corresponde a las horas comprendidas entre las 4:00 y las 9:00 horas, entre las 12:00 y las 18:00 horas, y entre las 21:00 y las 23:00 horas del día.
- *Periodo de Carga Mínima:* Corresponde a las horas comprendidas entre las 00:00 y las 4:00 horas y las 23:00 y las 24:00 horas.

Para verificar si el modelo del sistema de distribución puede suplir los valores carga máxima y mínima, se tomaron los datos históricos de potencia activa y potencia reactiva media en la cabecera del circuito (subestación Jamundí 115/13.2 kV desde la fecha 2016/01/01 a las 00:00 horas hasta 2016/07/31 a las 24:00 horas.

Del conjunto de datos mencionados anteriormente se seleccionó la curva de carga diaria que presentó el valor máximo y otra curva de carga diaria que presentó el valor mínimo de potencia activa. En Figura 26 se representan estas curvas.

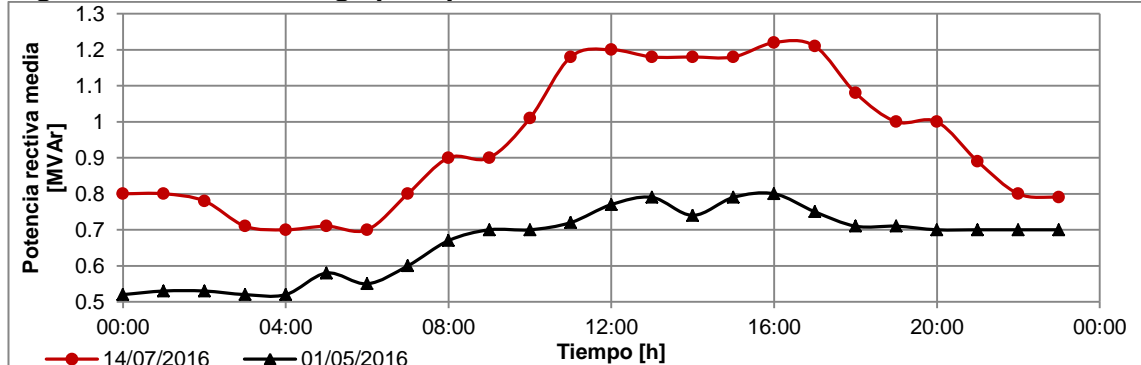
**Figura 26. Curva de carga para potencia activa del circuito Río Claro 13.2 kV.**



Fuente: Elaboración a partir de datos históricos del sistema SCADA de EPSA.

De las curvas de carga de la Figura 26 se obtiene un pico máximo de 2.81 MW y un valor mínimo de 1.10 MW, al cual le corresponde 1.00 MVAR y 0.52 MVAR respectivamente (véase la Figura 26 y la Figura 27).

**Figura 27. Curva de carga para potencia reactiva del circuito Río Claro 13.2 kV.**



Fuente: Elaboración a partir de datos históricos del sistema SCADA de EPSA.

En la Tabla 3 se presenta un resumen de estos datos de potencia activa y potencia reactiva. Además, se anexa el valor de corriente promedio correspondiente a cada periodo.

**Tabla 3. Valores de potencia activa y potencia reactiva de las Figuras 26 y 27**

Estado	Fecha	Periodo [desde - hasta]	Voltaje fase-fase [kV]	Potencia activa [MW]	Potencia reactiva [MVAR]	Corriente [A]
Carga máxima	14/07/2016	19:00 - 20:00	13.56	2.81	1.00	127.27
Carga mínima	01/05/2016	3:00 - 4:00	13.57	1.10	0.52	51.93

Fuente: Elaboración propia a partir de datos históricos del SCADA de EPSA.

Los datos obtenidos en Tabla 3 son acordes con los periodos en donde se presentan los valores de carga máxima y mínima de acuerdo a la resolución CREG 011 de 2009.

A continuación se presenta una tabla con los valores medidos, en la misma fecha y periodo que la Tabla 3, de potencia activa y potencia reactiva en los reconectores ubicados a lo largo del circuito Río Claro 13.2 kV (RB125, RB126, RB555 y RB542) véase la Figura 20.

**Tabla 4. Potencia activa y reactiva de los reconectadores del circuito Río Claro.**


Código del reconectador	Fecha	Periodo [desde - hasta]	Valor de P [kW]	Valor de Q [kVAr]
RB125	Jueves 14/07/2016	19:00 - 20:00	888.87	264.50
RB126			60.89	29.37
RB542			1295.28	388.33
RB555			117.68	31.00
RB125	Domingo 01/05/2016	3:00 - 4:00	316.19	179.74
RB126			60.89	29.37
RB542			503.31	247.04
RB555			17.00	8.00

Fuente: Elaboración propia a partir de datos históricos del SCADA de EPSA.

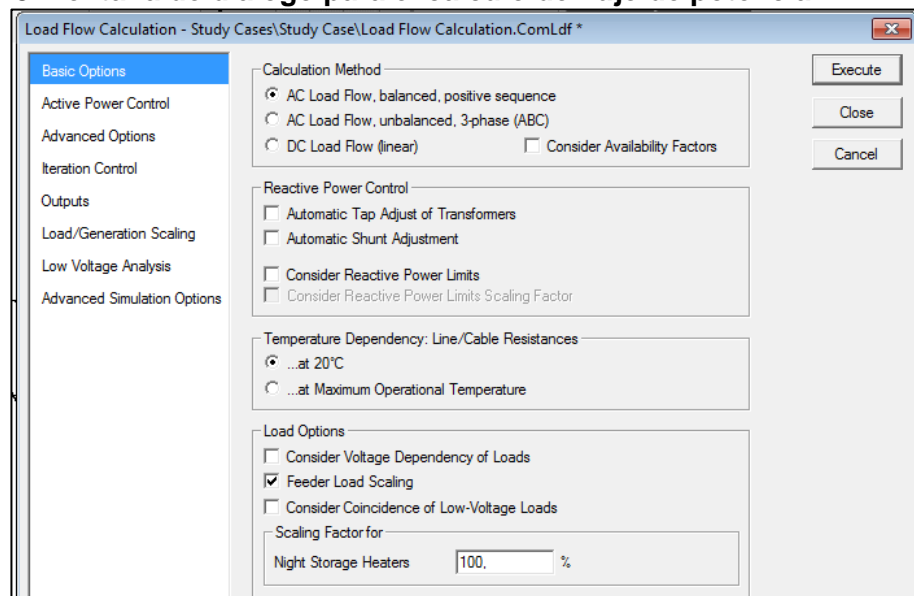
Es importante aclarar que: 1) del reconectador RB124 no se almacena ningún dato en el sistema SCADA, 2) el reconectador RB528 se encontraba abierto durante el periodo de carga máxima y carga mínima y 3) los reconectadores RB125, RB126, RB555 y RB542 solo almacenan y envían los valores de potencia activa y potencia reactiva, al sistema SCADA.

#### 4.2.2 Módulo de flujo de potencia en DlgSILENT.

Al tener el diagrama con los parámetros eléctricos del circuito Río Claro 13.2 kV, (véase la Figura 20), se simuló en DlgSILENT un flujo de potencia con valores de potencia activa y potencia reactiva registrados en Tabla 3 y Tabla 4.

Se da clic en el icono  de la barra principal de herramientas o desde el menú principal siguiendo la ruta *Calculation* → *Load Flow* → *Load Flow...* A continuación se muestra la ventana de dialogo para ingresar los parámetros flujo de potencia.

**Figura 28. Ventana de dialogo para el cálculo de flujo de potencia.**



Fuente: Herramienta computacional DlgSILENT.

#### 4.2.2.1 Opciones básicas (*Basic Options*)

- *AC Load Flow, balanced, positive sequence*: los parámetros eléctricos del circuito fueron dados de forma idéntica para cada fase, como se ilustró en el apartado 2.5.2.8 (*TypLine*), por este motivo se selecciona esta opción, la cual realiza un flujo de potencia para una sola fase mediante la representación de parámetros eléctricos de secuencia positiva [2].
- *...at 20 °C*: de acuerdo a los datos históricos de carga del circuito Río Claro 13.2 kV, la corriente no supera el 40% de la capacidad nominal de los conductores para el caso de carga máxima y es por esta razón que se selecciona esta opción.
- *Feeder Load Scaling*: Al seleccionar esta opción se distribuye la potencia activa y reactiva programada previamente en los alimentadores, *feeder*, por todas las cargas (centros de transformación o transformadores de distribución).

#### 4.2.2.2 Control de potencia activa (*Active Power Control*)

- *as Dispatched*: toma el *nodo slack* de referencia dado por el usuario, de lo contrario el programa asigna uno automáticamente, en este caso de estudio la red externa de alimentación, dada en 2.5.2.9, se toma como *nodo slack*.
- Las demás opciones de esta pestaña se dejan por defecto.

#### 4.2.2.3 Opciones avanzadas (*Advanced Options*)

- *Newton-Raphson (Power Equations, classical)*: al seleccionar esta opción se solucionan los sistemas de ecuaciones no lineales mediante un método iterativo.
- *No Topology Rebuild*: Acelera los cálculos consecutivos y evita reconstruir la topología del circuito para cada iteración.
- *Consideration of transformer winding ratio*: DIgSILENT automáticamente establece unos valores iniciales de voltaje en los nodos.
- Las demás opciones de esta pestaña se dejan por defecto.

#### 4.2.2.4 Control de iteraciones (*Iteration Control*)

- *Newton-Raphson Iteration*: Define el número máximo de iteraciones. Se asigna un valor típico de 25 [2].
- *Model Equations*: Establece el máximo error para el modelo de las ecuaciones, se toma un valor típico de 0.1%.
- *Nodes*: Error máximo por iteraciones y se toma un valor de 0.01 kVA dado que las medidas de potencia activa y potencia reactiva en los reconectores son reportadas al SCADA en kVA con dos decimales.
- *Automatic Model Adaptation for Convergence*: si no se encuentra una solución mediante modelos matemáticos no lineales, el programa intenta hacerlo lineal y al finalizar muestra las adaptaciones realizadas.
- Las demás opciones de esta pestaña se dejan por defecto.

#### 4.2.2.5 Referencia para los valores de salida (Outputs)

- *Max. Loading of Edge Element* (previa selección de la opción *show verification report*): valor de referencia para la carga máxima de los elementos del circuito. Se ingresa un valor de 80%, por encima de este valor se genera un informe de los elementos sobrecargados.
- *Lower Limit of Allowed Voltage* y *Upper Limit of Allowed Voltage* (previa selección de la opción: *show verification report*): Valor de referencia del mínimo y máximo voltaje permitido. De acuerdo a la resolución CREG 024 de 2005 [11], el valor de la tensión de estado estacionario a 60 Hz no podrá ser inferior al 90% ni superior al 110% del valor nominal, para este caso de estudio el valor nominal es de 13.2 kV. Por lo anterior, se ingresan los valores 0.9 y 1.1 p.u., respectivamente
- Las demás opciones de esta pestaña se dejan por defecto.

#### 4.2.3 Resultados obtenidos del módulo de flujo de potencia de DlgSILENT sin el uso de alimentadores (feeder).

En el numeral 2.5.2.6 se mostró el procedimiento para ingresar el modelo de los elementos de carga (transformadores de distribución). Uno de los parámetros mencionados en dicho numeral es el factor  $scale0=0.1$ , el cual indica el punto de operación y se asigna el mismo valor para todas las cargas.

En la Tabla 5 se muestran los valores de tensión, potencia activa y potencia reactiva en la cabecera del circuito (L150) y en los reconectores ubicados sobre el circuito de distribución (RB125, RB126, RB542 y RB545), Río Claro 13.2 kV. Lo anterior se realiza para la condición de todas las cargas con el factor  $scale0=0.1$  (véase el numeral 2.5.2.6).

**Tabla 5. Datos de voltaje, potencia activa y potencia reactiva obtenidos mediante el módulo de flujo de potencia de DlgSILENT sin el uso de alimentadores (feeder)**

Elemento	Voltaje fase-fase [kV]	Potencia activa [kW]	Potencia reactiva [kVAr]
L150	13.20	2569	1698
RB125	12.45	1467.61	198.66
RB126	12.45	69.00	13.00
RB542	12.62	589.27	259.21
RB555	12.46	81.98	22.00

Fuente: Elaboración propia.

Al analizar los datos obtenidos en la Tabla 5 se puede concluir, que al tener un factor de carga ( $scale0=0.1$ ) único para todas las cargas el sistema siempre entregará los mismos valores para un cálculo de flujo de potencia. Es posible ajustar el factor de escala ( $scale0$ ) de forma manual para cada elemento de carga (*ElmLod*), pero se tendría que hacer para 523 objetos, lo cual tomaría mucho tiempo.

Por lo anterior se requiere manejar diferentes factores de carga y una de las formas de realizarlo es utilizar alimentadores (*feeders*). En el numeral 4.2.4 se




Menciona la función, configuración y los puntos donde serán ubicados los alimentadores.

#### 4.2.4 Configuración del alimentador: *feeder* (*ElmFeeder*, ).

El alimentador (*feeder*) se utiliza para escalar la potencia activa y la potencia reactiva consumida por las cargas (centros de transformación o transformadores de distribución) conectadas a lo largo de un circuito de distribución.

Para este caso de estudio se definieron alimentadores (*feeders*) en los puntos donde se dispone de medidas de potencia activa y potencia reactiva, es decir, en la cabecera del circuito (subestación Jamundí 115 kV) y en cuatro reconectadores ubicados a lo largo del circuito (RB125, RB126, RB555 y RB542)

Para definir un alimentador se ingresa desde el menú principal siguiendo la ruta *data* → *edit relevant objects for calculation* → *feeder*. Se da clic en el icono *edit object* () y se selecciona la pestaña *load flow*. En el cuadro *load scaling*: *scaling factor* y *power factor* se selecciona *active power* y *reactive power* respectivamente y se ingresan los valores de la Tabla 3 o Tabla 4, para cada caso.

#### 4.2.5 Resultados obtenidos del módulo de flujo de potencia de DlgSILENT con el uso de alimentadores (*feeder*).

La comparación de los resultados obtenidos a partir del flujo de carga en DlgSILENT haciendo uso de alimentadores (*feeders*) versus los datos reales de potencia activa, potencia reactiva y corriente medidos en la cabecera del circuito, (véase la Tabla 3), y los medidos en los reconectadores ubicados a lo largo del circuito, (véase la Tabla 4), se muestran los resultados en la Tabla 6 y Tabla 7.

**Tabla 6. Comparación de datos real vs datos simulados para estado de carga máxima.**

Elemento	Datos reales del SCADA				Datos simulados de DlgSILENT			
	Voltaje fase-fase [kV]	Corriente [A]	Potencia activa [kW]	Potencia reactiva [kVAr]	Voltaje fase-fase [kV]	Corriente [A]	Potencia activa [kW]	Potencia reactiva [kVAr]
L150	13.56	127.27	2810	1000	13.56	126.99	2810	1000
RB125	-	-	888.87	264.5	12.65	9.59	888.87	264.5
RB126	-	-	203.87	50.47	12.65	42.33	203.87	50.47
RB542	-	-	1295.28	388.33	13	60.07	1295.28	388.33
RB555	-	-	117.68	31.00	12.98	5.41	117.68	31.00

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 7. Comparación de datos real vs datos simulados para estado de carga mínima.**

Elemento	Datos reales del SCADA				Datos simulados de DIgSILENT			
	Voltaje fase-fase [kV]	Corriente [A]	Potencia activa [kW]	Potencia reactiva [kVAr]	Voltaje fase-fase [kV]	Corriente [A]	Potencia activa [kW]	Potencia reactiva [kVAr]
L150	13.57	51.93	1100	520	13.57	52.00	1100	520
RB125	-	-	316.19	179.74	13.18	15.93	316.16	179.71
RB126	-	-	60.89	29.37	13.18	2.96	60.89	29.37
RB542	-	-	503.31	247.04	13.32	24.30	503.31	247.04
RB555	-	-	17.00	8.00	13.34	0.81	17.00	8.00

Fuente: Elaboración propia.

Al comparar los datos de voltaje y potencia simulados versus los datos reales disponibles del circuito de distribución se obtuvo un error relativo porcentual de cero, en el caso de la corriente (L150) se obtuvo un error del 0.22% y 0.13% para el caso de carga máxima y mínima respectivamente, el cálculo se realizó mediante la ecuación (1). Por dicha conclusión, no se utilizan otras columnas en la Tabla 6 y Tabla 7 para mostrar el error. Es decir, el modelo del circuito implementado en DIgSILENT tiene un comportamiento similar al circuito real, utilizando la aplicación de flujo de potencia.

En el numeral 4.2.2.5 se estableció el valor mínimo (0.9 p.u.) y máximo (1.1 p.u.) de voltaje permitido para un sistema de distribución de energía eléctrica. Durante la realización de las simulaciones, el módulo de flujo de potencia de DIGSILENT no generó ningún reporte con los nodos que no cumplieran los valores permitidos voltaje.

Por las consideraciones anteriores, se establece que el modelo implementado del circuito Río Claro 13.2 kV en la herramienta computacional DIgSILENT ha sido satisfactoriamente validado, mediante el módulo de flujo de potencia de dicha herramienta, entre el rango de mínima y máxima potencia registrada entre las fechas 2016/01/01 a las 00:00 horas hasta 2016/07/31 a las 24:00 horas

#### **4.3 VALIDACIÓN DEL MODELO IMPLEMENTADO MEDIANTE EL MÓDULO DE CORTOCIRCUITO DE DIgSILENT.**

Para la validación del modelo implementado mediante el módulo de cortocircuito de DIgSILENT, además de los valores de prefalla (V, I, P y Q), es necesario disponer de los oscilogramas de tensión y corriente durante falla y la ubicación real del punto de falla. Para obtener las magnitudes de tensión y corriente se dispone de los oscilogramas almacenados en el relé de protección asociado al interruptor ubicado en la cabecera del circuito (L150) y para la ubicación del punto real de la falla se cuenta con el **reporte de incidencias** generado por la compañía EPSA.

Una vez se cuenta con los datos mencionados anteriormente, se procedió a realizar la simulaciones en el módulo de cortocircuito de la herramienta

computacional DIgSILENT y se finalizó comparando los valores reales versus los valores obtenidos mediante simulación. Esto se realizó siguiendo la metodología para la ubicación de fallas propuesta en el trabajo de grado del ing. Wilman J. Pisso T. (véase la sección 3).

#### 4.3.1 Falla y tipos de fallas en sistemas de suministro de energía eléctrica.

Una falla en un circuito es cualquier evento que interfiere con el flujo normal de corriente; por ejemplo, un cortocircuito o un conductor abierto. Una falla casi siempre implica un cortocircuito entre fases energizadas o entre fase y tierra [12].

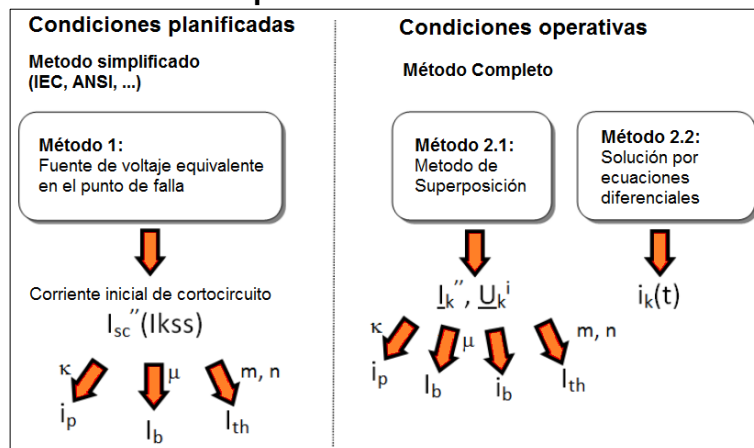
El mayor porcentaje de las fallas en los sistemas de suministro de energía son asimétricas y puede consistir en: una línea a tierra, línea a línea, doble línea a tierra, una fase abierta, entre otras; siendo las fallas monofásicas a tierra, en sistemas de distribución, las más comunes con un porcentaje aproximadamente del 70%. También pueden presentarse fallas simétricas en la cual las tres fases se unen instantáneamente [1].

La magnitud de la corriente de falla sólo está limitada por la impedancia del sistema y por la impedancia de falla, si esta existe. Las ecuaciones que determinan la magnitud de la corriente, para los diferentes tipos de falla hacen uso de la impedancia de secuencia positiva, negativa y cero del sistema. En la mayoría de casos, el tipo carga no cambia significativamente los resultados, en el caso de circuitos de distribución con configuración radial [12].

#### 4.3.2 Selección del método para el cálculo de la corriente de cortocircuito en DIgSILENT.

Para el cálculo de corriente de cortocircuito (falla trifásica, línea a línea, monofásica a tierra, entre otras) se tienen los siguientes métodos: norma IEC 60909/VDE 0102, norma ANSI y método completo. Los valores o cantidades producto de la simulación de cortocircuito en DIgSILENT, para diferentes métodos, se muestran en la Figura 29.

**Figura 29. Valores obtenidos a partir del cálculo de cortocircuito.**



Fuente: [2]

De acuerdo a la norma IEC 600909, la definición de los valores de interés observados en la Figura 29 son:

- $I''_{sc} = I''_k$  = Corriente de cortocircuito simétrica inicial (RMS).
- $i_p$  = Corriente pico de cortocircuito (valor instantáneo).
- $k$  = Factor para el cálculo de la corriente  $i_p$ .

A continuación se presentan las principales características de cada método de simulación que permite utilizar el módulo de cortocircuito de DlgSILENT.

- En el método planteado en la norma IEC 60909/VDE 0102 se desconocen las condiciones iniciales del sistema y opera independientemente del estado en prefalla. Se basan en valores nominales del circuito de distribución y utiliza factores de corrección ( $c$  y  $k$ ) para los voltajes e impedancias durante el cortocircuito, con lo cual da resultados conservadores. No tiene en cuenta la capacitancia de la línea, las admitancias en paralelo (excepto las de secuencia cero) y tampoco las cargas estáticas ( $ElmLod$ ) como lo son los transformadores de distribución.
- El método propuesto por las normas ANSI no tiene en cuenta las condiciones iniciales o de prefalla del circuito de distribución. Permite ingresar el valor de tensión en la barra o nodo en prefalla y se basa en tres redes formadas por las reactancias de los elementos que interviene la falla.
- En el método completo las condiciones de prefalla son conocidas y la corriente cortocircuito se determinan a partir de las condiciones en prefalla dadas por un flujo de potencia. Además, permite configurar los elementos de carga del circuito de distribución para que contribuyan a la corriente de cortocircuito.

De las características de los métodos de simulación de cortocircuito mencionadas anteriormente es importante tener en cuenta que entre más información se suministre al módulo de cortocircuito, mejores serán los resultados obtenidos. Es por esto que se selecciona el método completo ya que se cuenta con valores reales medidos (tensión y potencia) del circuito de distribución en el estado de prefalla que serán suministrados para obtener mediante simulación la tensión de prefalla en todos los nodos del circuito.

#### **4.3.3 Método completo (*Complete Method*)**


También conocido como método de superposición. El método completo, en términos del modelado del sistema, es un método de cálculo exacto a diferencia de los métodos de acuerdo a la norma IEC/VDE y ANSI que obtienen valores de corriente de cortocircuito por aproximaciones. La corriente cortocircuito durante la falla se determina a partir de las condiciones del sistema en prefalla, obtenida por un flujo de potencia en tal condición.

La condición de prefalla, por lo general, representa el estado de las fuentes de alimentación, la posición del cambiador de derivaciones de los transformadores reguladores, el estado de los interruptores y seccionadores, entre otros [2].

A medida que DlgSILENT actualiza sus versiones ha realizado mejoras a este método. Las principales mejoras se resumen a continuación:

- Una mayor precisión en el valor instantáneo de la corriente pico,  $i_p$ , la cual se calcula a partir de la corriente de cortocircuito simétrica inicial,  $I''_k$ , (calculada por este método) y la relación R/X (basada en la norma IEC 60909).
- Permite la configuración de las cargas para que puedan contribuir a la corriente de cortocircuito.

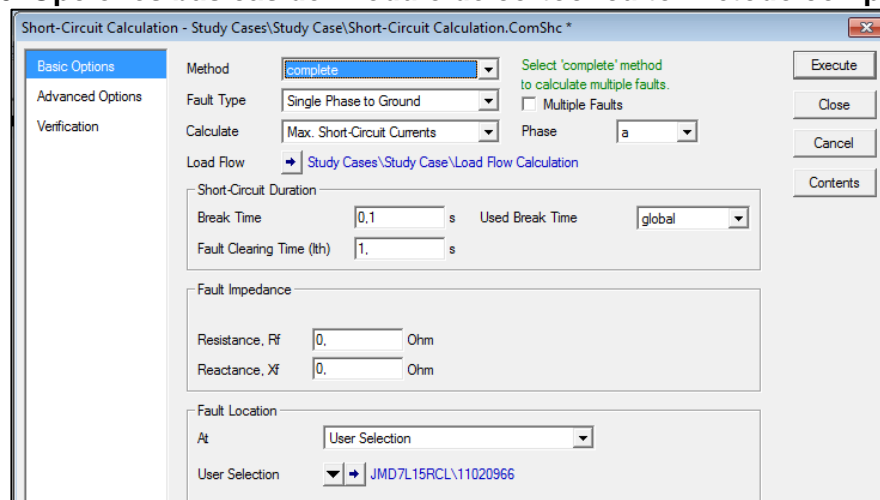
#### 4.3.4 Módulo de cortocircuito en DlgSILENT.

Hay diferentes formas de acceder al módulo de cortocircuito, entre ellas están: 1) seleccionando desde la barra principal de herramientas el icono , 2) desde la barra de menú siguiendo la ruta *calculation* → *short-circuit* → *short-circuit...* o 3) dando clic derecho sobre uno elemento del diagrama unifilar y seleccionando la ruta *calculate* → *short-circuit...* La última opción solo calcula la corriente de cortocircuito en el elemento seleccionado. Al finalizar, presionando el botón ejecutar (*execute*) se realiza el cálculo de corriente de cortocircuito, y si no se presenta ningún inconveniente, se muestran los resultados sobre el diagrama unifilar [2].

##### 4.3.4.1 Opciones básicas del módulo de cortocircuito para el método completo (*Basic Options*).

En el numeral 4.3.2 se seleccionó el método completo para obtener las corrientes de cortocircuito. En la Figura 30 se representan las opciones básicas para este método.

**Figura 30. Opciones básicas del módulo de cortocircuito. Método completo**



Fuente: Elaboración propia a partir de la herramienta computacional DlgSILENT.

#### - Tipo de falla (*Fault type*).

Teniendo en cuenta la configuración del circuito en estudio, trifásico sin hilo de neutro ni de tierra, DIgSILENT cuenta con los siguientes tipos de falla útiles para el estudio a realizar.

- *3-Phase Short-Circuit*. Cortocircuito trifásico.
- *2-Phase Short-Circuit*. Cortocircuito línea a línea.
- *Single Phase to Ground*. Cortocircuito monofásico a tierra.
- *2-Phase to Ground*. Cortocircuito doble línea a tierra.

#### - Calcular (*Calculate*).

Permite desplegar una lista donde se puede seleccionar corriente de cortocircuito máxima y mínima. Por ejemplo, si se selecciona la primera opción se tendrá en cuenta la corriente máxima de cortocircuito de la red externa (valores dados en *ElmXnet*).

#### - Flujo de potencia (*Load Flow*).

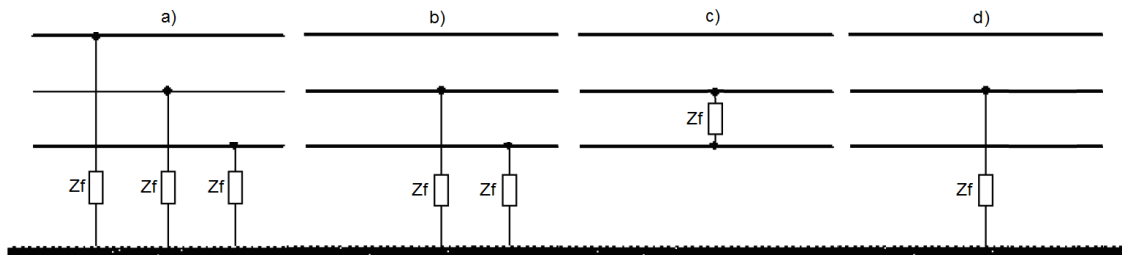
Las condiciones del sistema en prefalla utilizado por el método completo puede ser determinado ya sea por de un flujo de potencia o por medio de un método simplificado. Al disponer de las condiciones de prefalla del circuito en estudio se opta la opción de simular un flujo de potencia, esto se lleva a cabo seleccionando el icono (✚). La configuración se realiza de la de la misma manera a lo planteado en la configuración del módulo de flujo de carga en DIgSILENT (véase el numeral 4.2.2).

El flujo de potencia, para las condiciones de prefalla, puede iniciarse si la opción *Load Flow Initialization* de las opciones avanzadas (*Advanced Options*) de esta ventana se encuentra seleccionado.

#### - Impedancia de falla (*Fault impedance*).

La impedancia de falla corresponde a la resistencia y a la reactancia propia de la falla, por ejemplo la impedancia de arco del cortocircuito. Para ingresar la impedancia de falla se desactiva la opción *Enhanced Fault Impedance* y se ingresan los parámetros en las casillas  $X_f$  y  $R_f$ . El modelo implementado para diferentes tipos de falla se muestra a continuación.

**Figura 31. Modelo de la impedancia de falla para cortocircuito: a) trifásico, b) doble línea a tierra, c) línea a línea y d) monofásico a tierra.**




Fuente: [2]

#### - Localización de la falla (*Fault Location*).

- *At User Selection.* El usuario puede seleccionar un terminal (poste), barraje, línea, entre otros, para realizar la simulación. Esta opción será utilizada ya que es conocido el punto real donde ocurrió la falla.

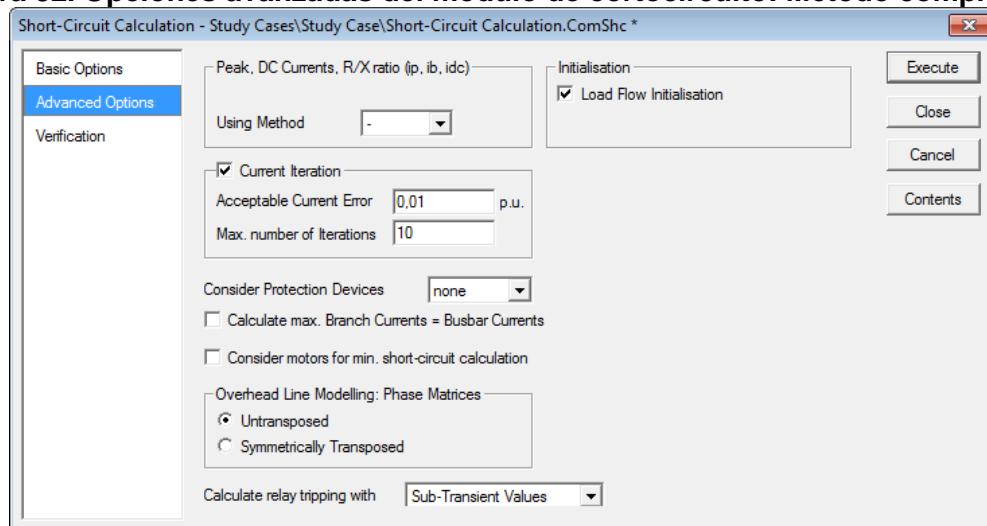
#### - Mostrar valores de salida (*Show Output*).

Cuando esta opción está activa, un reporte de los resultados obtenidos es mostrado en la ventana de salida de DlgSILENT. El comando para la configuración del reporte de salida se realiza mediante el botón .

#### 4.3.4.2 Opciones avanzadas para el método completo (*Advanced Options*)

La ventana principal para las opciones básicas del método completo se muestra en la Figura 32.

**Figura 32. Opciones avanzadas del módulo de cortocircuito: Método completo**



Fuente: Elaboración propia a partir de la herramienta computacional DlgSILENT.

#### **- Inicialización (*Initialization*)**

La opción *load flow Initialization* es seleccionada, la cual permite correr un flujo de potencia para el cálculo de las condiciones de prefalla.

#### **- Otros parámetros**

Las demás opciones serán dejadas por defecto, tal como se observa en la Figura 32.

#### **4.3.4.3 Verificación (*Verification*).**

Al seleccionar la opción de verificación, se puede introducir valores porcentuales máximos de carga (picos, interrupción y térmicos). Luego, en la ventana de salida se escribe un informe con los elementos que tienen valores más altos que los definidos inicialmente. Para este caso la opción se dejará deshabilitada.

#### **4.3.5 Clasificación y selección de los datos de entrada (casos de cortocircuito).**

Uno de los datos más relevantes para la validación del modelo implementado del circuito Río Claro, mediante el módulo de cortocircuito de la herramienta computacional DlgSIELNT, son los oscilogramas de tensión y corriente durante falla. Del total de archivos históricos de falla, almacenados en el relé de protección asociado al interruptor principal (L150), se recopiló un total de: cinco fallas monofásicas a tierra, cuatro fallas línea a línea y dos fallas trifásicas.

Adicional a lo anterior, es necesario conocer el punto real donde ocurrió la falla y los valores de voltaje, corriente y potencia (P y Q) de prefalla. El punto de falla se obtiene cruzando la fecha y hora de ocurrencia de la falla con los datos históricos almacenados en el **Reporte de Incidencias**, generado por la compañía EPSA.

Finalmente, se obtuvo el punto real de falla para los siguientes eventos de cortocircuito: dos fallas monofásicas a tierra, dos fallas línea a línea y una falla trifásica. Con esto se conforma cinco casos de cortocircuito que serán empleados para la validación del modelo del circuito Río Claro 13.2 kV, implementado en DlgSILENT.

#### **4.3.6 Datos reales de voltaje, corriente, potencia (P y Q) en estado de prefalla y durante falla y valores calculados de resistencia de falla.**

Durante la realización de este trabajo se encontró disponibilidad de oscilogramas de voltaje y corriente durante falla únicamente en el relé del interruptor cabecera (L150) y en los otros elementos telegestionados (RB124, RB125, RB126, RB528, RB542, y RB555) se dispone de la potencia de prefalla, excepto el reconectador RB528, y el estado *on/off* después de falla.

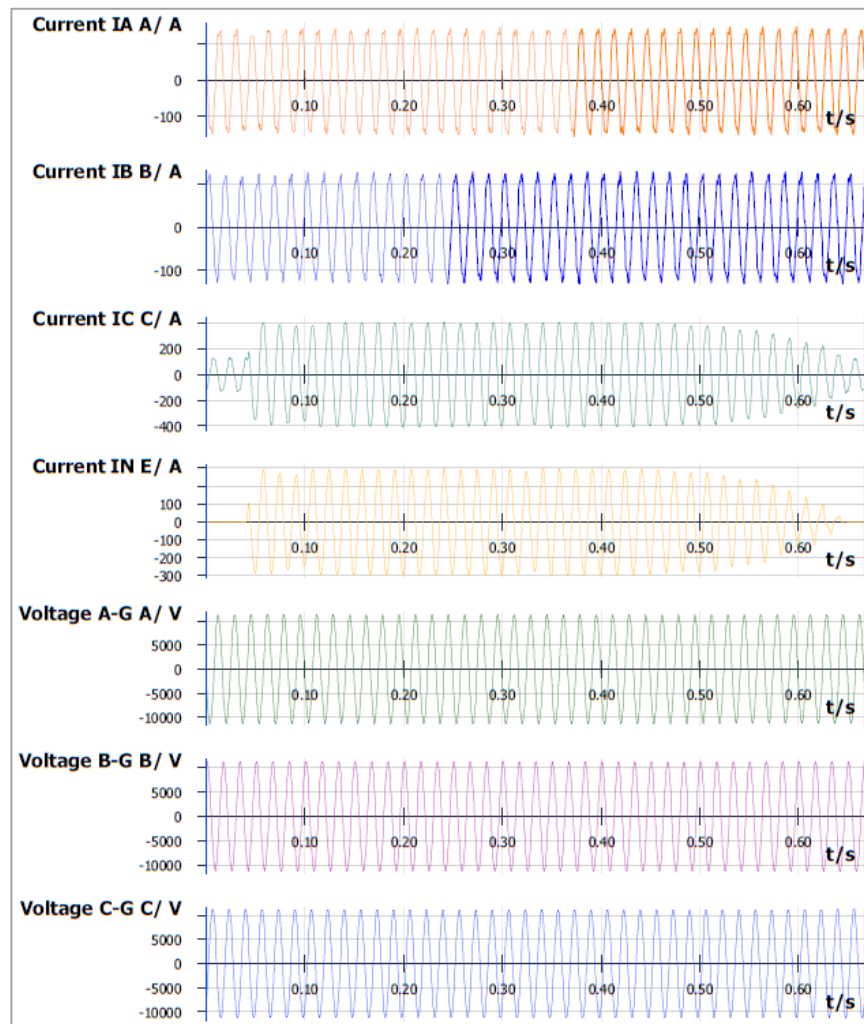


El relé de protección del interruptor cabecera (L150) almacena los oscilogramas de tensión de cada fase respecto a tierra y las corrientes por cada fase y por el conductor de neutro del transformador de potencia. Estos datos son descargados y analizados mediante el programa computacional SIGRA 4.5 de la compañía SIEMENS.

Una vez obtenidos los valores RMS de la tensión y corriente en prefalla y durante falla se siguen los pasos propuestos en el algoritmo para determinar el tipo y las fases involucradas en la falla (véase Figura 23)

En la Figura 33 se presenta uno de los oscilogramas de tensión y corriente en prefalla y durante falla obtenidos en el relé de protección ubicado en la cabecera del circuito. A partir de los valores RMS de tensión y corriente obtenidos de este oscilograma, se determina el tipo de falla que ocurrió, las fases involucradas y con el **reporte de incidencias** del circuito Río Claro 13.2 kV se determina el punto real de falla. Los demás registros de fallas en el circuito Río Claro 13.2 kV son mostrados en el Anexo A.

**Figura 33. Caso de cortocircuito 1: Oscilograma de corriente y tensión en prefalla y durante falla monofásica a tierra.**



Fuente: Elaboración propia a partir del programa SIGRA 4.5.

En la Figura 33, el tiempo se ubica sobre el eje de las abscisas en unidades de segundos y el valor instantáneo de la corriente por fase y del voltaje fase-tierra se ubica sobre el eje de las ordenadas en unidades de Amperes y Volts, respectivamente. Se observa sobre el eje de las abscisas que la falla monofásica a tierra ocurre entre 0 y 0.1 segundos, ocasionando un incremento en la magnitud de la corriente por la fase C y por el conducto de neutro. Para verificar lo mencionado anteriormente, es importante observar la escala en que se encuentra cada corriente por cada fase y por el conductor de neutro.

En la Tabla 8 se presenta un resumen con los valores de tensión y corriente en el estado de prefalla y durante falla para los 5 casos de cortocircuito. Estos datos son obtenidos a partir de los oscilogramas de falla registrados en el relé de protección ubicado en la cabecera del circuito Río Claro 13.2 kV.

**Tabla 8. Datos de tensión y corriente en prefalla y durante falla a partir de los oscilogramas de la Figura 33 y de la Figura 43 a la Figura 46**

Fase	Caso de cortocircuito	Tipo de falla	Fases involucradas	Nodo de falla	Pre- falla		Durante falla	
					Voltaje	Corriente	Voltaje	Corriente
					f-t [V]	[A]	f-t [V]	[A]
A	1	Monofásica a tierra	Falla entre fase C y tierra	20921	7916	100.7	7919.4	103.8
B					7974.8	86.7	7972.2	86.6
C					7995.4	91.5	7917.3	291.6
N*					-	0.4	-	207.7
A	2	Monofásica a tierra	Falla entre fase B y tierra	15222	7846.9	73.1	7849	56
B					7926	62.2	7349.5	995
C					7947.1	64.7	7966.3	75.1
N*					-	0.1	-	968.2
A	3	Línea a línea	Falla entre fases B y C	20895	7706.8	95.3	7698.7	127
B					7770.6	84.5	7467.9	1210
C					7811	87.1	6994.9	1156.8
N*					-	0.3	-	0.2
A	4	Línea a línea	Falla entre fases A y B	232416	7774.6	80.4	7579	1139.2
B					7865.1	70.9	7085.3	1103.3
C					7877.1	69.7	7879.2	91.2
N*					-	0.4	-	0.1
A	5	Trifásica	Falla entre fases A, B y C	20966	7803.5	79.2	7148.1	1085.8
B					7869.1	67.7	7195.8	1150
C					7884.9	71.5	7201.1	1156.9
N*					-	0.1	-	0.6

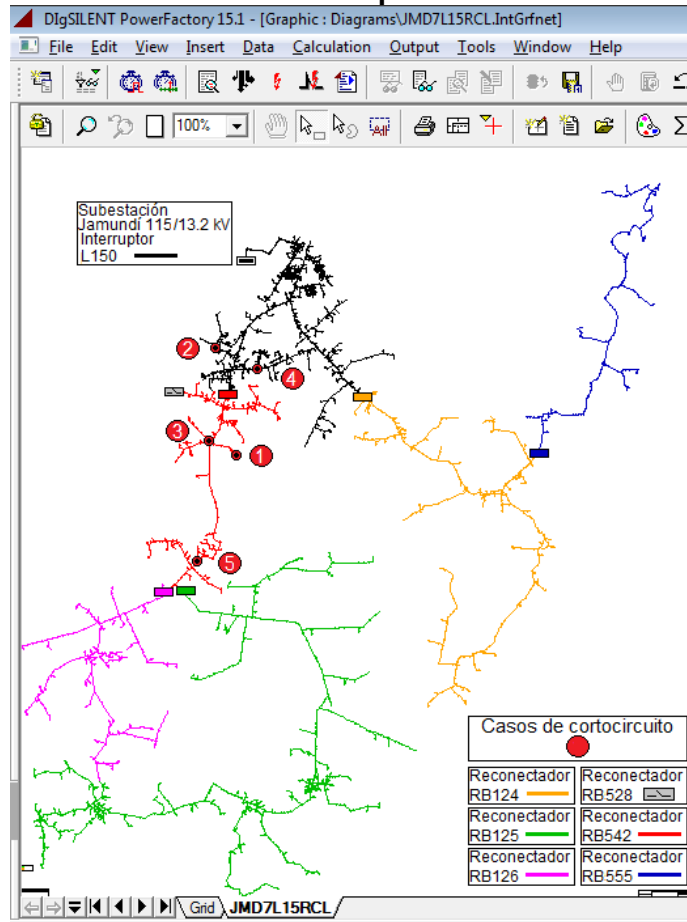
\* Medida de corriente en el conductor de neutro puesto a tierra del transformador de potencia.

Fuente: Elaboración propia a partir del programa SIGRA 4.5.

La ubicación real del nodo de falla se toma de los registros de **reporte de incidencias** generado por la compañía EPSA.

En la Figura 34 se representa la ubicación de los nodos de falla para los cinco casos de cortocircuito. Esto se realiza sobre el diagrama unifilar del circuito Río Claro 13.2 kV representado en la herramienta computacional DIgSILENT.

**Figura 34. Ubicación de los nodos de falla para los cinco casos de cortocircuito**



Fuente: Elaboración propia a partir de la herramienta computacional DigSILENT.

Para las simulaciones de cortocircuito mediante la herramienta computacional DigSILENT, además de los datos de la Tabla 8, se requiere conocer los valores de potencia activa, potencia reactiva en estado de prefalla y el valor de la resistencia asociada al elemento que causa la falla eléctrica.

En la Tabla 9 se presenta un resumen de los valores de potencia activa y reactiva en prefalla medida en la cabecera del circuito (L150) y en los reconductores ubicados a lo largo del circuito de distribución (RB124, RB125, RB126, RB542 y RB555) para los cinco casos de estudio. Los datos anteriores son necesarios para el cálculo de la corriente de cortocircuito mediante el **método completo**, (véase el numeral 4.3.3) ya que este método calcula los voltajes de prefalla en todos los nodos mediante la simulación de un flujo de potencia.

**Tabla 9. Valores de potencia activa y potencia reactiva en estado de prefalla para los caso de cortocircuito de 1 a 5.**

Caso de cortocircuito	Elemento o equipo	Prefalla	
		P [MW]	Q [MVar]
1. Falla monofásica a tierra	L150	1.913497	1.11801
	RB125	0.46558	0.2567
	RB126	0.12383	0.04658
	RB542	0.81621	0.46621
	RB555	0.08501	0.02264
	RB528	0	0
2. Falla monofásica a tierra	L150	1.403097	0.713657
	RB125	0.35801	0.2066
	RB126	0.07968	0.02368
	RB542	0.56262	0.274
	RB555	0.017	0.023
	RB528	0	0
3. Falla línea a línea	L150	1.89399	0.82849
	RB125	0.30695	0.13654
	RB126	0.15086	0.05373
	RB542	0.46067	0.204
	RB555	0.017	0.009
	RB528	0	0
4. Falla línea a línea	L150	1.567411	0.718487
	RB125	0.36409	0.17822
	RB126	0.13955	0.04445
	RB542	0.65497	0.31084
	RB555	0.018	0.008
	RB528	0	0
5. Falla trifásica	L150	1.562147	0.691962
	RB125	0.38373	0.19664
	RB126	0.069	0.013
	RB542	0.58269	0.25673
	RB555	0.08198	0.022
	RB528	0	0

Fuente: Elaboración propia a partir del programa SIGRA 4.5 y los datos del sistema SCADA de EPSA

En la Tabla 10 se presentan los valores de resistencia de falla calculados a partir de la metodología para ubicación de fallas propuesta en el trabajo de grado del Ing. Wilman J. Pisso T. (véase el numeral 3.2.2). Los valores obtenidos para cada caso de cortocircuito son los siguientes.

**Tabla 10. Resistencias de falla calculada para los cinco casos de cortocircuito**

Caso de cortocircuito	Nodo de falla	Resistencia de falla $R_f$ [ $\Omega$ ]
1. Falla monofásica a tierra	20921	29.516
2. Falla monofásica a tierra	15222	2.119
3. Falla línea a línea	20895	2.414
4. Falla línea a línea	232416	4.178
5. Falla trifásica	20966	0

Fuente: Elaboración propia

Los valores obtenidos para los 5 caso de estudio de cortocircuito (véase la Tabla 8, Tabla 9 y Tabla 10) serán útiles para simular y validar el modelo eléctrico del circuito Río Claro 13.2 kV, mediante el módulo de cortocircuito de DigSILENT.

#### 4.3.7 Resultados obtenidos mediante el módulo de cortocircuito de DigSILENT.

En la Tabla 11 se presentan los resultados obtenidos para los cinco casos de cortocircuito. Lo anterior se realiza mediante el módulo de cortocircuito de DigSILENT utilizando el método completo y los datos de la Tabla 8, Tabla 9 y Tabla 10.

**Tabla 11. Valores de cortocircuito reales, simulados y error relativo porcentual para los cinco caso de cortocircuito.**

Fase	Caso de cortocircuito	Durante falla – medido (L150)		Durante falla – simulado (L150)			Error voltaje [%]	Error corriente [%]
		Voltaje f-t [V]	Corriente [A]	$R_f$ [ $\Omega$ ]	Voltaje f-t [V]	Corriente [A]		
A	1. Falla monofásica a tierra. Nodo: 20921	7919.4	103.8	29.516	7964.2	90.0	0.57%	13.29%
B		7972.2	86.6		7958.2	92.9	0.18%	7.27%
C		7917.3	291.9		7868.8	286.4	0.61%	1.88%
N*		-	207.7		-	199.2	-	4.09%
A	2. Falla monofásica a tierra. Nodo: 15222	7849.0	56.0	2.119	7894.3	63.4	0.58%	13.21%
B		7349.5	995.0		7285.6	953.1	0.87%	4.21%
C		7966.3	75.1		7917.4	61.4	0.61%	18.24%
N*		-	968.2		-	909.0	-	6.11%
A	3. Falla línea a línea. Nodo: 20895	7698.7	127.0	2.414	7762.8	88.8	0.83%	30.08%
B		7467.9	1210.0		7407.6	1075.3	0.81%	11.13%
C		6994.9	1156.8		6980.7	1036.0	0.20%	10.44%
N*		-	0.2		-	0	-	-
A	4. Falla línea a línea. Nodo: 232416	7579.0	1139.2	4.178	7586.6	1090.5	0.10%	4.27%
B		7085.3	1103.3		7042.4	1068.4	0.61%	3.16%
C		7879.0	91.2		7838.9	73.3	0.51%	19.63%
N*		-	0.1		-	0.0	-	-
A	5. Falla trifásica Nodo: 20966	7148.1	1085.8	0	7230.7	953.0	1.16%	12.23%
B		7195.8	1150.0		7230.7	953.0	0.49%	17.13%
C		7201.1	1156.9		7230.7	953.0	0.41%	17.62%
N*		-	0.6		-	0.0	-	-

\* Medida de corriente en el conductor de neutro puesto a tierra del transformador de potencia.

Fuente: Elaboración propia

A partir de los datos registrados en la Tabla 11 se realizó el siguiente análisis.

- En la falla monofásica a tierra, para el caso de cortocircuito 1, se puede observar que el error relativo porcentual del voltaje es menor a 0.61% y en la corriente, siendo de interés la fase C y la corriente por conductor de neutro del transformador de potencia, se presenta un error relativo porcentual menor al 4.09%.
- Para la falla monofásica a tierra del caso de cortocircuito 2 se obtuvo un error relativo porcentual del voltaje menor al 0.87% y en la corriente un error menor

al 6.11%, siendo de interés la corriente de la fase B y la corriente a través del conductor de neutro del transformador de potencia.

- Para la falla línea a línea del caso de estudio 3 se obtuvo un error relativo porcentual en voltaje menor al 0.83%, mientras que en la corriente, el error relativo porcentual fue menor al 11.13%, siendo de interés las fases B y C.
- En el caso de cortocircuito 4, correspondiente a una falla línea a línea, se obtuvo un error relativo porcentual de voltaje y de la corriente inferior al 0.61% y 4.27%, respectivamente. En este caso, son de interés las corrientes de las fases A y B
- Para el caso de cortocircuito 5, el cual corresponde a una falla trifásica, se obtuvo un error relativo porcentual en voltaje y corriente menor al 1.16% y 17.62%, respectivamente.
- Los errores relativos porcentuales de voltaje fueron inferiores al 1.16% con un promedio de 0.57%. En el voltaje durante falla de la fase A, para el caso de cortocircuito 5, fue el único error relativo por encima del 1%. Si en total se compararon 15 voltajes durante falla y en un caso no se cumplió lo esperado, esto equivale a decir que en el 6.6% de casos se obtuvo un error por fuera de lo esperado, lo cual es un error aceptable en ingeniería. Por lo anterior, se cumple lo planteado inicialmente: obtener un error relativo porcentual inferior al 1% en tensión para la ubicación real del punto de falla.
- En los errores relativos porcentuales de corriente fue donde se presentó mayor dispersión entre los datos, esto es para los casos de cortocircuito 3 y 5 donde se alejan del 5% de error esperado para la ubicación real del punto de falla. No obstante, entre los casos de cortocircuito 1, 2 y 4 se obtuvo solo un valor por encima del 5% (máximo error esperado), el cual fue del 6.11% para el caso de cortocircuito 2, y los demás por debajo del 5% con un error promedio del 3.95%. Lo anterior es considerando solo las fases involucradas en la falla.
- En cuanto al error para la corriente de las fases que no se encuentran en falla se obtuvo un error relativo porcentual máximo de 30.08% y un promedio de 16.95%. Esto es debido a que el módulo de cortocircuito de DIgSILENT, empleando el método completo para la simulación, calcula un flujo de potencia balanceado para determinar los valores de tensión en todos los nodos en estado de prefalla [2]. Luego se calculan los voltajes y corrientes durante el cortocircuito, y tal como se mencionó en 4.3.3, los valores reportados son obtenidos mediante la superposición de los dos escenarios, corrientes producto de la simulación del flujo de potencia y las debidas a la simulación del cortocircuito. Dado lo anterior y teniendo en cuenta que las corrientes reales de prefalla son desbalanceadas, aparece un error grande (superior al 5%) en las corrientes durante cortocircuito de las fases que no se encuentran en falla.

- De los cinco casos de cortocircuitos disponibles para este trabajo de grado, en tres de ellos se obtuvieron errores relativos porcentuales en tensión y corriente durante falla menores al 1% y al 5%, respectivamente. Lo anterior se obtiene al comparar los datos reales de cortocircuito versus los datos obtenidos mediante el módulo de cortocircuito de la herramienta computacional DIgSILENT. Al tener 3 de 5 casos que cumplen con los errores en tensión y corriente de cortocircuito, es equivalente a tener un 60% de casos de éxito para la ubicación real del punto de falla.
- Según [7], del total de fallas en sistemas de distribución, aproximadamente el 70% corresponde a fallas monofásicas a tierra. Por lo anterior, se considera que al cumplir el error relativo porcentual en corriente durante cortocircuito, menor al 5%, para el caso 1 y 2 (falla monofásica a tierra) se está cubriendo satisfactoriamente cerca del 70 % del total de fallas en sistemas de distribución de energía eléctrica.

Dado el análisis anterior, se considera que el modelo implementado del circuito Río Claro 13.2 kV en la herramienta computacional DigSILENT ha sido favorablemente validado mediante el módulo de cortocircuito para los cinco casos de estudio, los cuales cuentan con la información necesaria para el desarrollo de este trabajo de grado.

## **5 SIMULACIONES DE CORTOCIRCUITO MONOFÁSICO A TIERRA, LÍNEA A LÍNEA TRIFÁSICO EN LOS POSIBLES NODOS DE FALLA DEL CIRCUITO DE RÍO CLARO 13.2 kV.**

### **5.1 INTRODUCCIÓN**

Las simulaciones de cortocircuito monofásico a tierra, línea a línea y trifásico para todos los posibles nodos de falla se realizarán para los cinco casos de cortocircuito disponibles en este trabajo de grado (véase el numeral 4.3.5), los cuales cumplen con la totalidad de información de entrada planteada como requisito de la metodología para la ubicación de fallas (véase el numeral 3.2.1). Es importante aclarar que no se dispone de información en estado de posfalla para los casos de cortocircuito 1, 2 y 4.

En este capítulo se obtendrá la base de datos con información de voltaje y corriente de cortocircuito para todos los posibles nodos de falla del circuito de distribución Río Claro 13.2 kV. Las simulaciones de cortocircuito y la base de datos se obtendrán de forma automática para los cinco casos de cortocircuito. La base de datos con la información de voltajes y corrientes de cortocircuito se almacenará en archivos con formato de la herramienta de *Microsoft Excel*. Dicha base de datos será entregada al Ing. Wilman J. Pisso T., quién la empleará para el desarrollo de su trabajo de grado de maestría en la Universidad del Valle.

DlgSILENT dispone del comando DPL útil para implementar las simulaciones de cortocircuito y obtener los resultados de forma automática. Se inicia este capítulo abordando la estructura, la Interfaz gráfica, los datos de entrada y el lenguaje de programación del comando DPL de DlgSILENT empleado para la sistematización de tareas.

Se finaliza mostrando la arquitectura empleada para tomar los datos reales de los cinco casos de cortocircuito (véase el numeral 4.3.6), direccionarlos de acuerdo a la metodología para la ubicación de falla e ingresar los datos de entrada al comando DPL para obtener la base de datos con información de voltaje y corrientes de cortocircuito para los posibles nodos de falla. Adicionalmente, se indicará la ubicación grafica de los posibles nodos de falla en el diagrama unifilar del circuito de distribución Río Claro 13.2 kV.

### **5.2 LENGUAJE DE PROGRAMACIÓN EN DlgSILENT - DPL-**

#### **5.2.1 Introducción.**

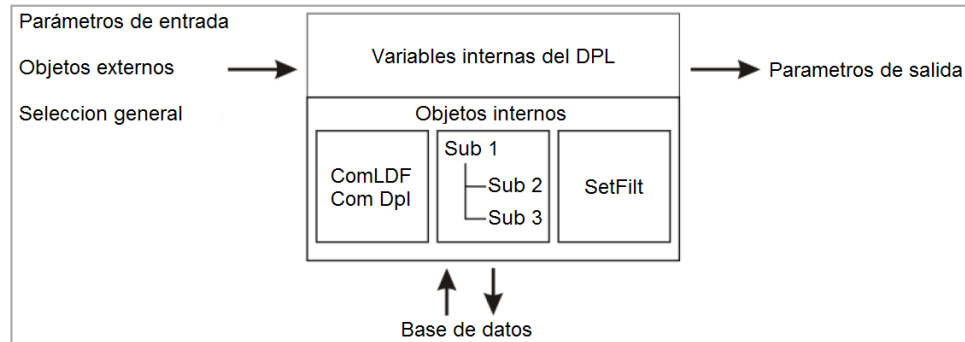
El lenguaje de programación en DlgSILENT -DPL- ofrece al usuario una interfaz para la automatización de rutinas, realizar cálculos iterativos y hacer procesamiento de datos. La programación se realiza mediante líneas de instrucciones (*script*) y se pueden utilizar para el cálculo de flujo de potencia o cortocircuito [2], el cual es de gran importancia para realizar las simulaciones de cortocircuito de forma automática en todos los posibles nodos de falla.



### 5.2.2 Estructura principal del comando DPL.

En la Figura 35 se representa la estructura principal del comando DPL de DlgSILENT

**Figura 35. Estructura del comandos DPL**



Fuente: [2]

El comando DPL (*ComDpl*) es el elemento central y ejecuta instrucciones (*scripts*) a partir de diversos parámetros de entrada, variables u objetos internos para luego exportar resultados o cambiar parámetros [2].

Como entrada a las líneas de instrucciones (*scripts*) se pueden tomar objetos desde el diagrama unifilar o definir variables en la entrada gráfica del comando DPL [2].

El comando DPL siempre se estará comunicando con la base de datos y almacenará cambios en los ajustes, parámetros o resultados de los objetos de la base de datos. La base de datos comprende todos los objetos creados para la representación del circuito de distribución mediante parámetros eléctricos (véase el capítulo 2).

### 5.2.3 Crear y ejecutar comandos en DPL

*ComDpl* puede ser creado siguiendo la siguiente ruta desde la ventana principal de DlgSILENT. Se da clic en *Open Data Manager...* (📁), ubicado en la barra principal de herramientas, → *New Object* (📄) → *DPL Command and more* → *Element: DPL Command (ComDpl)*. Al presionar OK se crea un nuevo *ComDpl*.

El archivo queda almacenado en la siguiente ruta: *Open Data Manager...* (📁) → *library* (📁) → *Scripts* (📄). Al hacer clic derecho sobre el archivo y luego editar se puede acceder a la ventana del *DPL Command*, desde donde se puede crear y editar las líneas de instrucciones (*scripts*).

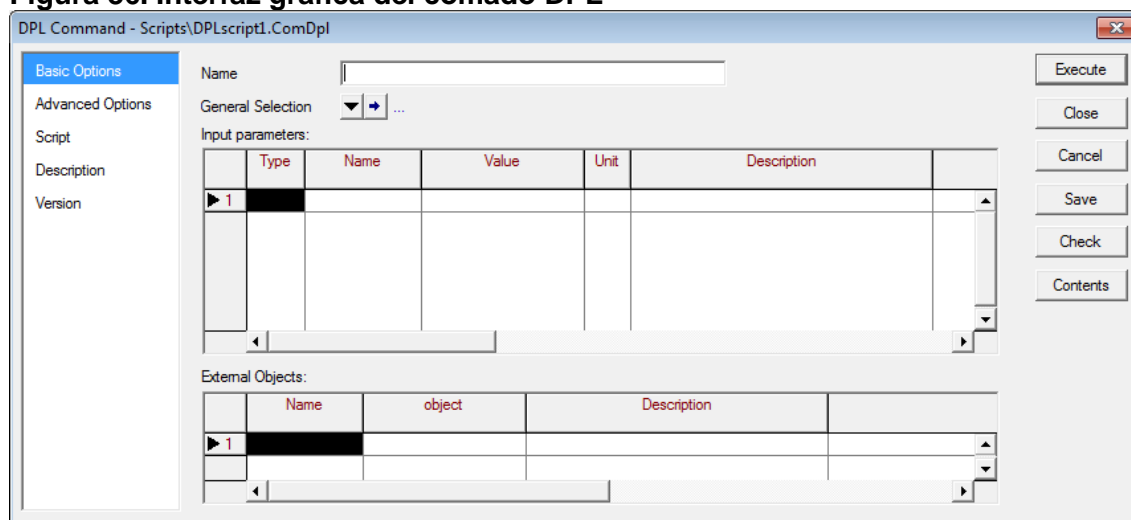
Para ejecutar los comandos creados en DPL se accede desde la barra principal de herramientas dando clic en *Execute Script* (📄), luego se despliega una lista de comandos, se selecciona el que se requiera ejecutar y se finaliza dando clic derecho → *Execute*. Por defecto aparecerán otros *scripts* preestablecidos

por DlgSILENT, por ejemplo, reporte de fallas (*fault report*), resistencia de arco de cortocircuito (*shc\_arc\_resistance*), entre otros. Desde esta ventana se pueden editar los comandos siguiendo esta ruta: *Edit Object* (📄) → *Script* → ➡ → *Script*.

#### 5.2.4 Interfaz gráfica del comando DPL

En la Figura 36 se muestra la interfaz gráfica del comando DPL, en la cual se definen los elementos de entrada, se escriben las líneas de instrucciones (*script*), se crean subrutinas y se ejecuta el comando DPL.

**Figura 36. Interfaz gráfica del comando DPL**



Fuente: Elaboración propia a partir de la herramienta computacional DlgSILENT.

##### 5.2.4.1 Opciones básicas.

En esta pestaña del comando DPL se puede establecer la selección general (*general selection*), ingresar los parámetros de entrada (*input parameters*), seleccionar los objetos externos (*external objects*) y acceder a los objetos internos (*contents*) [13].

##### - Parámetros de entrada (*input parameters*)

En esta matriz, los parámetros de entrada del comando DPL se definen de la siguiente forma.

- *Type*. Los tipos de variables que se pueden definir son: *int* (número entero), *doublé* (número real de máximo 15 dígitos), *string* (cadena de caracteres), *set* (colección de cualquier tipo de objetos) y *object* (cualquier objeto de DlgSILENT)
- *Name*. Se define el nombre de la variable y se debe de escribir sin espacios ni guiones

- *Value*. Dependiendo del tipo de variable (*type*), se asigna el valor correspondiente.
- *Unit*. Se asigna las unidades con la que se ingresa el valor de la variable (*value*).
- *Description*. Se describe el nombre de la variable, el valor que puede tomar u otro.

#### - Objetos internos (*external objects*)

Son objetos de DIgSILENT que se crean dentro del comando DPL y se utilizan para dar acceso a diferentes funcionalidades, como cálculo de flujos de potencia, cálculo de cortocircuito, construcción de gráficas, acceso a cualquier comando de DIgSILENT (incluyendo el comando DPL), entre otras [13].

Para crear objetos internos se debe seguir la siguiente ruta: hacer clic en el botón *contents* (véase la Figura 36) → *new object* (📄) y seleccionar el objeto de la lista *Elements* y *Element*.

#### 5.2.4.2 Líneas de instrucciones (*Script*)

En esta ventana se encuentra la ventana *program text*, en la cual se ingresa el código o las líneas de instrucciones. El lenguaje de programación de DIgSILENT, *DPL*, utiliza una sintaxis similar al C++.

La sintaxis de programación se puede dividir en las siguientes partes: definición de variables, asignaciones y expresiones, instrucciones de programa y llamadas a métodos [2].

### 5.3 POSIBLES NODOS DE FALLA DEL CIRCUITO DE DISTRIBUCIÓN OBTENIDOS MEDIANTE EL COMANDO DPL DE DIgSILENT.

#### 5.3.1 Introducción.

Para obtener de forma automática los posibles nodos de falla en el circuito de distribución Río Claro 13.2 kV, se basó en el comando DPL *FaultReport*, el cual viene por defecto en la herramienta computacional DIgSILENT, y se adaptó a las necesidades de este trabajo de grado.

De forma general, se conservó la estructura de los objetos internos, el nombre de las variables, se adicionaron algunos métodos disponibles en DPL y se modificaron las líneas de instrucciones.

Finalmente, se obtiene una base de datos almacenada en formato de *Microsoft Excel*, con los valores de corriente y voltaje en los posibles nodos de falla, y la ubicación gráfica de estos nodos sobre el diagrama unifilar del circuito de distribución implementado en la herramienta computacional DIgSILENT.

La base de datos será obtenida individualmente para cada uno de los cinco casos de cortocircuito y se tendrá en cuenta la información obtenida y calculada en el capítulo 4 (parámetros o datos de entrada).

### 5.3.2 Arquitectura de programación en el comando DPL.

Para obtener los voltajes y corriente de cortocircuito para los posibles nodos de falla, vistos desde la subestación cabecera (L150), se sigue la metodología para la ubicación de fallas propuesta en el trabajo de grado del ing. Wilman J. Pisso T. (véase la Figura 22).

Tal como se ilustra en la Figura 35, la estructura del comando DPL requiere: datos o parámetros de entrada, objetos internos o externos y el código o líneas de instrucciones que serán ejecutadas (*script*). Al ejecutar el comando DPL se obtiene unos resultados, en este caso corresponde a los posibles nodos para una falla determinada.

#### 5.3.2.1 Parámetros de entrada

A continuación se presentan los diferentes parámetros de entrada para obtener, de forma automática, los valores de voltaje y corriente de cortocircuito para todos los posibles nodos de falla

##### - Estado lógico de los elementos de corte en prefalla y posfalla

El estado de los elementos de corte (L150, RB124, RB125, RB126, RB528, RB542, y RB555) es tomado indirectamente a partir de los datos históricos de potencia registrados en el sistema SCADA de EPSA. Si en el elemento de corte hay registro de potencia en el estado de prefalla, indica que se encuentra en estado *on*, de lo contrario el estado será *off*. En la Tabla 9 se presentó un resumen de potencia activa y reactiva medida para los cinco casos de cortocircuito en estado de prefalla

El ingreso del estado de los elementos de corte (*ElmCoup*) se realiza de forma manual siguiendo la ruta: *edit relevant objects for calculation* (🔍) → *breaker/switch* (🔌) → y en la columna *closed* se selecciona *closed* (☑) u *open* (☐)

El estado de los elementos de corte en posfalla es tomado desde el **Módulo de Operaciones** de EPSA, y se utiliza como referencia para definir gráficamente la zona que no hacen parte los posibles nodos de falla.

Del Módulo de Operaciones de EPSA se obtuvo que en el caso de cortocircuito tres y cinco, operó o cambio de estado (*on/off*) el reconector RB542 y para los demás casos de cortocircuito (uno, dos y cuatro) no se registraron maniobras en los re conectadores o del interruptor cabecera (L150).

**- Magnitud de potencia activa y potencia reactiva en prefalla medida en la cabecera y en los reconectores del circuito.**

Esta información es tomada de la Tabla 9, que corresponde a los valores de potencia activa y potencia reactiva en el estado de prefalla. Esta información se utiliza para determinar los voltajes de prefalla, mediante el cálculo de un flujo de potencia antes del ejecutar la simulación de cortocircuito (véase el numeral 4.3.3).

Los datos de potencia activa y potencia reactiva en estado de prefalla se ingresa en los alimentadores (*feeder*) mediante la siguiente ruta: *edit relevant objects for calculation* (🔍) → *feeder* (🔗) → se da clic en el icono *edit object* (🔧) y se selecciona la pestaña *load flow*. En el cuadro *load scaling: scaling factor* y *power factor*, se selecciona *active power* y *reactive power* respectivamente

**- Magnitud de la tensión en prefalla y durante falla medida en la cabecera del circuito.**

La magnitud de tensión en prefalla se toma de la Tabla 11 y se ingresa mediante la siguiente ruta: *edit relevant objects for calculation* (🔍) → *external grid* → se da clic en el icono *edit object* (🔧) y se selecciona la pestaña *load flow*. En el cuadro *operation point* se va a *voltage stpoint* y se ingresa la magnitud de tensión en p.u. sobre la base de 13.2 kV.

La tensión durante falla también se toma de los datos de la Tabla 8, Tabla 11 y se ingresa como parámetro de entrada (*input parameters*) mediante la interfaz gráfica del comando DPL. A este parámetro se le acciona en nombre *VccSDTFault*.

En la Figura 37 se muestra el parámetro *VccSDTFault* y los demas parámetros de entrada (*input parameters*) que se ingresan a través de la interfaz gráfica del comando DPL, los cuales serán explicados en adelante.

**Figura 37. Parámetros de entrada ingresados a través de la interfaz gráfica DPL**

The screenshot shows the 'DPL Command - Scripts\FaultReport.ComDpl \*' window. It has a sidebar with 'Basic Options' selected. The main area shows 'Name' as 'FaultReport' and 'General Selection' as 'Study Cases\Study Case\DPL Commands Set'. Below is a table of 'Input parameters'.

	Type	Name	Value	Unit	Description
1	double	Rf		Ohm	Impedancia de falla, R
2	double	Xf		Ohm	Impedancia de falla, X
3	int	method			Metodo: 0=IEC 1=complete
4	int	iall			Calculo de falla en: 0=nodos seleccionados, 1=todos los nodos
5	int	iExcel			Exporta los resultados: 0=ventana de salida de DlgSILENT, 1=MS Excel
6	int	faulttype			1=Falla Monofasica, 2=Falla Bifásica, 3=falla trifásica
7	int	SinglePhaFaul			Falla Monofásica:0=Fase A, 1=Fase B, 2=Fase C
8	int	DoubPhaFaul			Falla Bifásica:0=Fase AB, 1=Fase BC, 2=Fase CA
9	double	IccSinlePhaN		kA	Corriente de cortocircuito por el cond. de Neutro
10	double	IccDoubPhaRef		kA	Corr. de Ccto bifasica de referencia (El menor error de las fases en falla)
11	double	IccThrePhaRef		kA	Corr. de Ccto trifásica de referencia (El menor error de las fases en falla)
12	double	PerEnCurr		%	Error porcentual en corriente (cod Neutro o menor valor para falla 2f o 3f)
13	double	PerEnVolt		%	Error porcentual en voltaje
14	double	VccSDTFault		kV	Voltaje de Ccto de referencia (Falla 1F, 2F ó 3F)

Fuente: Elaboración propia a partir de DlgSILENT (*ComDpl*)

**- Magnitud de la corriente durante falla mediada en la cabecera del circuito.**

La corriente de falla medida en la cabecera del circuito (L150) se toma de la Tabla 11 y se ingresa mediante la interfaz gráfica del comando DPL. Se asigna el parámetro de corriente de cortocircuito por el conductor de neutro del transformador de potencia, la corriente de cortocircuito línea a línea y trifásica con el nombre de *IccSinlePhaN*, *IccDoubPhaRef* y *IccThrePhaRef* respectivamente (véase la Figura 37).

**- Tipo de falla (bloque 1, véase la Figura 22).**

En el numeral 4.3.6 se determinó el tipo de falla para cada caso de cortocircuito y quedó el registro en la Tabla 8 y en la Tabla 11. Estos datos se ingresan a través de la interfaz gráfica del comando DPL mediante el parámetro para el tipo de falla, *faultype*, la fase en falla para un cortocircuito monofásico a tierra y línea a línea, *SinglePhaFaul* y *DoubPhaFaul* respectivamente (véase la Figura 37).

**- Resistencia de falla (bloque 2, véase la Figura 22).**

La resistencia de falla se calculó siguiendo el procedimiento correspondiente del numeral 3.2.2 y los valores obtenidos, para cada caso de cortocircuito, quedaron registrados en la Tabla 10. Este valor se ingresa mediante la interfaz gráfica del comando DPL con el nombre de *Rf* (véase la Figura 37).

**- Comparación del error relativo porcentual en voltaje y corriente durante falla: valor real versus valor simulado (bloque 7 y 8, véase la Figura 22).**

En la metodología para la ubicación de fallas propuesta en el trabajo de grado del Ing. Wilman J. Pisso T. (véase el capítulo 3) se planteó tener en cuenta como posibles nodos de falla, aquellos que cumplieran con un error relativo porcentual inferior al 1% y 5% para el voltaje y la corriente, respectivamente.

Con los resultados obtenidos en la Tabla 11, se analizó que para los cinco casos de estudio se cumplía con el 1% de error relativo porcentual en tensión durante falla, pero el error en corriente en algunos casos fue mayor al 5%.

Por la razón anterior, se ingresa mediante la interfaz gráfica del comando DPL, el 1% como error máximo permitido en voltaje durante falla mediante el parámetro *PerErrVolt*. De los errores de corriente durante falla, obtenidos en la Tabla 11, se toma: para una falla monofásica a tierra el error de la corriente por el conductor de neutro del transformador de potencia, para una falla línea a línea y trifásica el menor error obtenido entre las fases en falla. Al comando DPL principal (*FaultReport*), el parámetro de error relativo porcentual en corriente se ingresa con el nombre de *PerErrCurr* (véase la Figura 37).

## - Otros parámetros de entrada

Dado que se utilizó como referencia el comando DPL *FaultReport*, que viene por defecto en la herramienta computacional DlgSILENT, se decidió conservar algunas variables de entrada. Estas variables se enuncian a continuación y pueden consultarse en la Figura 37.

- *Xf* = permite ingresar el valor de la reactancia asociada al elemento que provoca la falla.
- *method* = permite seleccionar el método con el que se realizarán las simulaciones de cortocircuito (método IEC o método completo). Para este trabajo de grado se empleará el método completo, el cual fue seleccionado y caracterizado en el numeral 4.3.2 y 4.3.3.
- *iall* = permite elegir si el cortocircuito se simulara en todos los nodos del circuito o en algunos nodos.
- *iExcel* = permite imprimir los resultados obtenidos en la ventana de salida de DlgSILENT o enviarlos a una hoja de *Excel*.

### 5.3.2.2 Estructura de las líneas de instrucciones (*script*) del comando DPL principal (*ComDpl*): *FaultReport*

El orden con que se escribieron las líneas de instrucciones del comando DPL principal (*FaultReport*) es el siguiente:

- 1) Se definen las variables internas (variables tipo) que serán utilizadas a lo largo de las líneas de instrucciones (*script*) del comando DPL *FaultReport*.
- 2) Se restaura el estado de todos los nodos que se encuentran fuera de servicio al estado en servicio (energizados)
- 3) Mediante el parámetro de entrada *faulttype* (véase la Figura 37), se selecciona el método que será empleado para el cálculo de cortocircuito (método IEC o método completo)
- 4) Mediante el parámetro de entrada *iall* (véase la Figura 37), se determina si el cortocircuito será simulado en todos los nodos o en nodos seleccionados.
- 5) A través del parámetro *Rf* y *Xf* (véase la Figura 37), se ingresa el valor de resistencia y reactancia de falla.
- 6) Se selecciona y ordena alfabéticamente los nodos que están en servicio (energizados) para realizar las simulaciones de cortocircuito.
- 7) Se realizan las simulaciones de cortocircuito, nodo a nodo mediante el método completo, y lo realiza ejecutando el objeto interno *ShcCalc*. Se configuran las filas y columnas de la matriz de resultados, ejecutando el objeto interno *IntMatrix*, y finaliza almacenando los resultados del cortocircuito en la matriz de resultados, ejecutando el objeto interno *WriteMatrix*.

- 8) Se finaliza definiendo si la matriz de resultados será exportada a la ventana de salida del DIgSILENT, ejecutando el objeto interno *Output*, o si será almacenada y mostrada en una hoja con formato de *Microsoft Excel*, ejecutando el objeto interno *ToExcel*. Lo anterior se determina mediante el parámetro de entrada *iExcel* (véase la Figura 37).

El desarrollo de las líneas de instrucciones (*script*) para el comando DPL *FaultReport* puede ser consultado en el Anexo B

### **5.3.2.3 Objetos internos del comando DPL principal (*ComDpl*): *FaultReport***

En el numeral 5.2.4.1 se definieron los objetos internos como accesos a diferentes funcionalidades de DIgSILENT. En este caso se utilizaron para dar acceso al módulo de cortocircuito y a otros comandos DPLs, que realizan diferentes rutinas mediante la ejecución de líneas de instrucciones (*script*).

A continuación se presentan los objetos internos creados dentro del comando DPL principal (*FaultReport*).

#### **- Comando para acceder al módulo de cortocircuito (*ComShc*): *shc*.**

Este objeto interno se utiliza para configurar de las opciones básicas del módulo de cortocircuito (véase el numeral 4.3.4.1). A este objeto interno llegan los parámetros de entrada *Rf*, *Xf*, *method*, *iall*, *faulttype*, *SinglePhaFaul*, y *DoudPhaFaul* (véase la Figura 37).

#### **- Comando DPL para el cálculo de cortocircuito (*ComDpl*): *ShcCalc***

A este objeto interno ingresa el parámetro de entrada *faulttype* (véase la Figura 37) y dependiendo de este valor, se ejecuta el cortocircuito monofásico a tierra, línea a línea o trifásico. Las líneas de instrucciones (*script*) se puede consultar en la Figura 47 del Anexo C

#### **- Comando para el almacenamiento de datos (*IntMat*): *Results***

Este objeto interno permite almacenar la información que sea direccionada hacia cada uno de sus componentes. Inicialmente se cree la cantidad de filas y columnas, asignándoles un nombre (*InitMatrix*), para luego almacenar los datos requeridos (*WriteMatrix*).

#### **- Comando DPL para asignar el nombre de filas y columnas de la matriz de resultados (*ComDpl*): *InitMatrix***

Cada vez que se ejecute el comando DPL principal (*FaultReport*), este objeto interno se ejecuta una vez y se define el nombre de las filas y columnas de la matriz de resultados (*Results*). Las líneas de instrucciones se pueden revisar en la Figura 48 del Anexo C



**- Comando DPL para ingresar los resultados a los elementos de la matriz (ComDpl): *WriteMatrix***

A este objeto interno ingresan los parámetros de entrada *faulttype*, *IccSinlePhaN*, *IccDoubPhaRef*, *IccThrePhaRef*, *PerErrCurr*, *PerErrVolt* y *VccSDTFault* (véase la Figura 37).

Dependiendo del valor del parametro *faulttype* se determina en que direcciones de la matriz se deben almacenar los datos de voltaje y corriente de cortocircuito. Los otros parámetros de entrada permiten filtrar los valores de voltaje y corriente de cortocircuito simulados que cumplen con los requisitos de error relativo porcentual (*PerErrCurr* y *PerErrVolt*). Las líneas de instrucciones se muestran en la Figura 49 del Anexo C

**- Comando DPL para exportar la matriz de resultados a Excel (ComDpl): *ToExcel***

Inicialmente se planteó obtener la base de datos con la información del voltaje y la corriente de cortocircuito en los elementos de protección telegestionados, lo cual incluye al relé del interruptor cabecera (L150) y los reconectores ubicados a lo largo del circuito (RB124, RB125, RB126, RB528, RB542, y RB555).

Tal como se mencionó en el numeral 4.3.6, el relé del interruptor cabecera (L150) es el único elemento telegestionados que almacena datos reales durante falla. Por esta razón la base de datos almacenará la información del voltaje y la corriente de cortocircuito vista desde la subestación cabecera (L150)

En el objeto interno *ToExcel* (comando DPL) ingresa el parámetro de entrada *faulttype* (véase la Figura 37), y dependiendo del valor asignado, retornará los resultado de voltajes y corrientes de cortocircuito para una falla monofásica a tierra, línea a línea o trifásica. Las líneas de instrucciones se muestran en la Figura 49 del Anexo C.

Para las columnas de la hoja de *Excel* de define inicialmente: el nodo de falla, el tipo de falla, el nombre de la fase, la ubicación desde donde se ve la falla y las unidades de medida. En la Figura 38 muestra el arreglo de las columnas de *Excel* donde será almacenado el voltaje y la corriente de cortocircuito para los posibles nodos de falla vista desde la subestación cabecera (L150)

**Figura 38. Arreglo de las columnas en Excel para obtener la base de datos con la información del voltaje y la corriente de cortocircuito para todos los posibles nodos de falla.**

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1		Falla 1fase	Falla 1fase	Falla 1fase	Falla 1fase	Falla 1fase	Falla 1fase	Falla 1fase	Falla 2fases
2	Nodo	Fase A-t(L150)	Fase B-t(L150)	Fase C-t(L150)	Fase A(L150)	Fase B(L150)	Fase C(L150)	Cond. de N(L150)	Fase A-t(L150)
3		[kV]	[kV]	[kV]	[kA]	[kA]	[kA]	[kA]	[kV]
4									

	A	I	J	K	L	M	N	O	P
1		Falla 2fases	Falla 2fases	Falla 2fases	Falla 2fases	Falla 2fases	Falla 2fases	Falla 3fases	Falla 3fases
2	Nodo	Fase A-t(L150)	Fase B-t(L150)	Fase C-t(L150)	Fase A(L150)	Fase B(L150)	Fase C(L150)	Fase ABC-t(L150)	Fase ABC(L150)
3		[kV]	[kV]	[kV]	[kA]	[kA]	[kA]	[kV]	[kA]
4									

Fuente: Elaboración propia

Además de obtener la base de datos con los posibles nodos de falla, mediante programación se obtiene gráficamente la ubicación de los nodos sobre el diagrama unifilar del circuito de distribución Río Claro 13.2 kV, el cual fue implementado en la herramienta computacional DlgSILENT (véase el numeral 2.6).

#### **- Comando DPL para exportar la matriz de resultados la ventana de salida de DlgSILENT (*ComDpl*): *Output***

Mediante este objeto interno se exporta el contenido de la matriz de resultados a la ventana de salida de DlgSILENT. Este objeto normalmente no se ejecuta debido a que el resultado solo permite ser visualizado.

#### **5.3.3 Resultados obtenidos mediante el comando DPL *FaultReport* en DlgSILENT**

La base de datos con la información de voltaje y corriente de cortocircuito para los posibles nodos de falla, y la ubicación sobre el diagrama unifilar del circuito de distribución, será desarrollada en este capítulo solamente para el caso de cortocircuito 3 y 5. Estos casos son seleccionados porque dispone de información del estado de los elementos de corte en posfalla. La base de datos para los demás casos de cortocircuito, 1, 2 y 4, puede ser consultada en los anexos D, E y F, respectivamente.

#### **- Base de datos con la información de voltajes y corrientes para todos los posibles nodos de falla y la ubicación gráfica en diagrama unifilar para el caso de cortocircuito 3.**

El caso de cortocircuito 3 corresponde a una falla línea a línea entre la fase B y C, ocurrida en el nodo 20895 (nombre segunda la BDI de EPSA). La información complementaria y los datos de entrada para este caso de cortocircuito pueden ser consultados en el numeral 4.3.6.

En la Figura 39 se muestra en resumen la base de datos para los posibles nodos de falla, obtenidos a partir de parámetros de entrada y programación del

comando DPL *FaultReport*. También se indica que el nodo real donde ocurrió la falla está contenido en la base de datos.

**Figura 39. Base de datos con la información de voltaje y corriente para todos los posibles nodos de falla del caso de cortocircuito 3.**

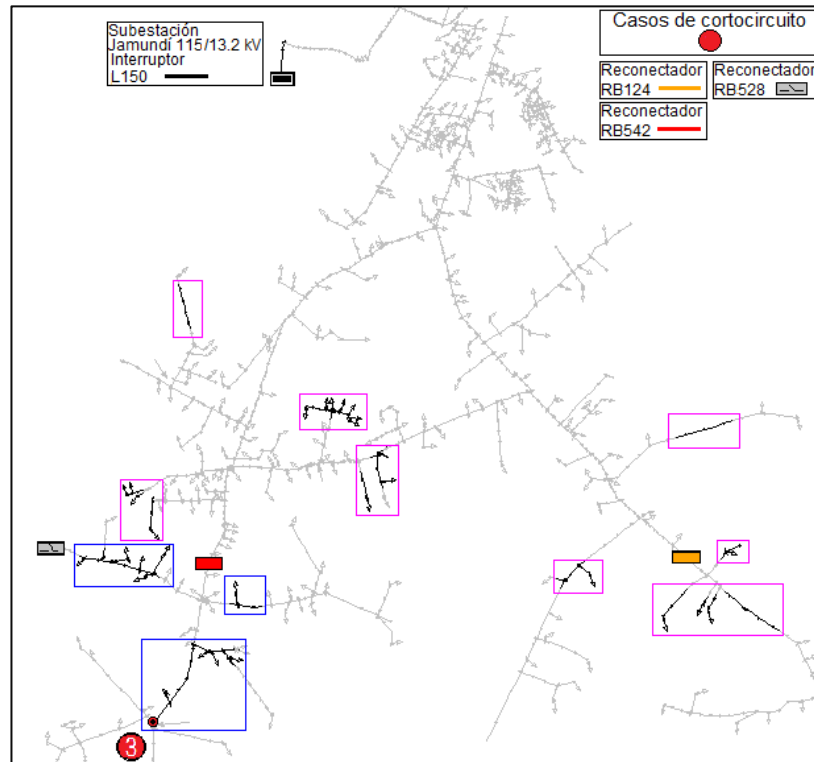
	A	I	J	K	L	M	N
1		Falla 2fases	Falla 2fases	Falla 2fases	Falla 2fases	Falla 2fases	Falla 2fases
2	Nodo	Fase A-t(L150)	Fase B-t(L150)	Fase C-t(L150)	Fase A(L150)	Fase B(L150)	Fase C(L150)
3		[kV]	[kV]	[kV]	[kA]	[kA]	[kA]
4	114591	7.7628	7.4058	6.9751	0.0888	1.0823	1.0431
5	114592	7.7628	7.4032	6.9666	0.0888	1.0930	1.0539
6	14755	7.7628	7.4412	6.9397	0.0888	1.1298	1.0955
64	20895	7.7628	7.4076	6.9807	0.0888	1.0753	1.0361
72	42930	7.7628	7.4026	6.9610	0.0888	1.1001	1.0611
73	50472	7.7628	7.4295	6.9389	0.0888	1.1297	1.0943
74	50743	7.7628	7.4202	6.9254	0.0888	1.1465	1.1105

Fuente: Elaboración propia

De un total de 2472 nodos del circuito de distribución Río Claro 13.2 kV, en la base de datos mostrada en la Figura 39 se obtuvieron 71 posibles nodos de falla, lo cual equivale a reducir los nodos de búsqueda a un 2.87% del total de nodos. Lo anterior es sin considerar la información de posfalla, es decir, el cambio de estado *on/off* de los elementos de corte del circuito (interruptor y reconectores).

En la Figura 40, con líneas de color negro, se muestra la ubicación de los posibles nodos de falla sobre el diagrama unifilar del circuito de distribución Río Claro 13.2 kV. Las líneas de color gris representan los nodos y tramos que no hacen parte de la base de datos como posibles nodos de falla. También se muestra la ubicación real del punto de falla para el caso de cortocircuito 3 y la ubicación del interruptor cabecera y de tres reconectores

**Figura 40. Ubicación grafica sobre el diagrama unifilar para todos los posibles nodos de falla del caso de cortocircuito 3.**



Fuente: Elaboración propia

Con la información del estado en posfalla, *on/off*, de los elementos de corte se puede acotar los posibles puntos de falla. Como se mencionó anteriormente, en este caso de cortocircuito se registró una maniobra por parte del recontactador RB542. Sobre la Figura 40 se muestra la reducción del número de posibles nodos de falla al conocer la información de posfalla de los elementos de corte. Los recuadros en color magenta encierran los posibles nodos de falla que se descartan con ayuda del estado del recontactador RB542 y dentro de los recuadros de color azul se encuentran los nodos con alta probabilidad de ubicar el punto real de falla.

Al analizar la ubicación grafica de los posibles puntos de falla de la Figura 40, se ve como la múltiple estimación del punto de falla obedece a factores como: conductores de diferente calibre, medición en un solo terminal y topología radial y altamente ramificada.

**- Base de datos con la información de voltajes y corrientes para todos los posibles nodos de falla y la ubicación grafica en diagrama unifilar para el caso de cortocircuito 5.**

El caso de cortocircuito corresponde a una falla trifásica ocurrida en el nodo 20966, para la cual operó el recontactador RB542. La información adicional y los datos de entrada para determinar la base de datos puede ser consultada en el numeral 4.3.6

Para este caso de cortocircuito se obtuvo la información de voltaje y corriente para 102 posibles nodos de falla entre un total de 2472 nodos, lo cual equivale a reducir los nodos de búsqueda del punto de falla a un 4.13%, esto sin tener en cuenta el estado de los reconectadores en posfalla. En la Figura 41 se muestra un resumen de la base de datos para los posibles nodos de falla del caso de cortocircuito 5 y se resalta el nodo real donde ocurrió la falla.

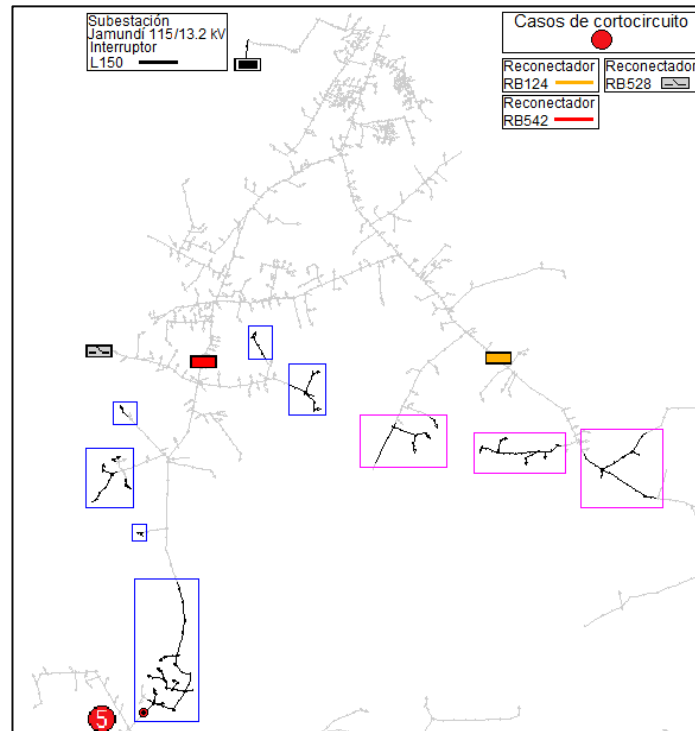
**Figura 41. Base de datos con la información de voltaje y corriente para todos los posibles nodos de falla del caso de cortocircuito 3.**

	A	O	P
1		Falla 3fases	Falla 3fases
2	Nodo	Fase ABC-t(L150)	Fase ABC(L150)
3		[kV]	[kA]
4	13311	7.2076	1.1127
5	16265	7.1226	1.2035
6	16268	7.1253	1.2073
7	16269	7.1448	1.1852
8	16270	7.1647	1.1625
9	16271	7.1833	1.1410
83	20966	7.2307	0.9530
100	36811	7.1690	1.0958
101	36812	7.1754	1.0870
102	40023	7.1044	1.1817
103	44229	7.0671	1.1930
104	44230	7.0699	1.1894
105	44231	7.0749	1.1830

Fuente: Elaboración propia

En la Figura 42 se ha ubicado gráficamente el listado de posibles nodos de falla sobre el diagrama unifilar del circuito de distribución Río Claro 13.2 kV, los cuales fueron obtenidos en la base de datos de la Figura 41. Las líneas de color negro representan la ubicación de los posibles nodos de falla y las líneas de color gris indican los nodos y los tramos que no son considerados en la base de datos. Los recuadros de color magenta encierran los nodos que son posibles puntos de falla pero que se descartan con la información del estado en posfalla del reconectador RB542 y con color azul se encierran los posibles nodos de falla con la mayor probabilidad de encontrar el punto real de falla.

**Figura 42. Ubicación grafica sobre el diagrama unifilar para todos los posibles nodos de falla del caso de cortocircuito 5.**



Fuente: elaboración propia

Al analizar la Figura 40 y la Figura 42 se ve la importancia de tener información de los elementos de corte en estado de posfalla, ya que permite filtrar la base de datos y se disminuye el problema de la múltiple estimación del punto de falla.

Al tener conductores de diferente calibre y una topología radial y altamente ramificada en los circuitos de distribución ocasiona que los posibles nodos de falla se ubiquen hacia la periferia de los circuitos ramales formando un contorno respecto a un circuito principal. En el circuito de distribución Río Claro 13.2 kV los ramales tienen un menor calibre del conductor que los circuitos principales o “trocales”.

En la Figura 42 se observa que los posibles nodos de falla encerrados con recuadros azules se encuentran alejados uno del otro. Para solucionar este tipo de problemas se plantea la necesidad de contar con información adicional que permita apartar o excluir determinados puntos de falla.

En [7] y [10], además de los Métodos Basados en el Modelo (MBM), la ubicación del punto de falla en los sistemas de distribución se aborda mediante los Métodos de Clasificación Basados en el Conocimiento (MCBC). Estos métodos se apoyan en la información obtenida del registro de fallas y a cada evento se le asigna una ubicación dentro del circuito de distribución y una probabilidad de ocurrencia. Es por esto que se ve la necesidad de implementar los MBM como herramienta para disminuir el problema de la múltiple estimación del punto de falla.

Finalmente, la metodología para la ubicación de falla propuesta en el trabajo de grado del Ing. Wilman J. Pisso T., permitió obtener la base de datos con los posibles puntos de falla para cinco casos de cortocircuito. A continuación se presenta la Tabla 12 con el resumen de los casos de cortocircuito y los resultados obtenidos mediante la base de datos de las Figuras 39, 41, 50, 52 y 54.

**Tabla 12. Resumen de casos de cortocircuito y de los resultados de la base de datos.**

Caso de cortocircuito	Tipo de falla	Fases involucradas	Nodo de falla	Resistencia de falla [ $\Omega$ ]	Total de nodos	Posibles nodos de falla	% del total de nodos [%]
1	Monofásica a tierra	Falla entre fase C y tierra	20921	29.516	2472	241	9.75%
2	Monofásica a tierra	Falla entre fase B y tierra	15222	2.119		30	1.21%
3	línea a línea	Falla entre fases B y C	20895	2.414		71	2.87%
4	línea a línea	Falla entre fases A y B	232416	4.178		55	2.22%
5	Trifásica	Falla entre fases A, B y C	20966	0		102	4.13%

Fuente: Elaboración propia.

## 6 CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

### 6.1 CONCLUSIONES.

- El arreglo de datos en hojas de *Excel* y en la interfaz DGS de DlgSILENT permitió modelar el circuito de distribución Río Claro 13.2 kV, a partir de una Base de Datos de Instalaciones -BDI- de una forma ágil y ordenada. En resumen, los datos modelados en DlgSILENT fueron: 2472 nodos, 2448 tramos, 523 cargas y una extensión de 177.05 km e implementar esta cantidad de información de forma manual hubiese requerido de mucho tiempo.
- El circuito de distribución implementado en DlgSILENT fue llevado a las condiciones de carga requeridas tanto para validar el modelo mediante flujo de potencia como para determinar los voltajes y corrientes de prefalla al realizar las simulaciones de cortocircuito. El ajuste del consumo de potencia activa y potencia reactiva en cada elemento de carga se puede hacer de forma manual, pero hay que tener en cuenta que son 523 elementos. Una solución práctica para solucionar esta situación fue implementar alimentadores (*feeders*) en puntos donde se dispone de valores medidos de potencia y desde allí, el alimentador asigna valores proporcionales de potencia consumida en cada elemento de carga.
- La metodología para la ubicación de fallas propuesta en el trabajo de grado del Ing. Wilman J. Pisso fue una herramienta útil para determinar el valor de resistencia asociado al elemento en falla. Durante la validación del modelo implementado del circuito de distribución, mediante simulaciones de cortocircuito, se evidenció la importancia que tiene este parámetro para obtener errores aceptables tanto en voltaje como en corriente de cortocircuito.
- Para las simulaciones de cortocircuito se seleccionó el método completo, en el cual se calculan las corrientes de falla a partir de las condiciones de prefalla obtenidas mediante un flujo de potencia. Los valores de prefalla obtenidos para los cinco casos de cortocircuito evidenciaron el desbalance que existe tanto en tensión como en corriente para cada fase. Estos dos escenarios introdujeron un error adicional al comparar los datos reales contra los datos simulados en los estados de prefalla y durante falla.
- Para obtener la base de datos con información de voltaje y corriente de cortocircuito fue necesario realizar simulaciones en los 2472 nodos del circuito. Esta tarea fue implementada y automatizada mediante el uso del comando DPL *FaultReport* en DlgSILENT. Además, mediante criterios de decisión se filtraron los nodos que no cumplían con las condiciones de voltaje o corriente de cortocircuito.
- En el circuito de distribución Río Claro 13.2 kV se cuenta con 2472 nodos, en los cuales se realizaron simulaciones de cortocircuito de forma automática. Con los resultados obtenidos se elaboró la base de datos con



información de voltaje y corriente de cortocircuito para los posibles nodos de falla de los cinco casos de estudio. En cuatro casos se obtuvo una base de datos con menos de 102 nodos (4.13%) y en un caso particular se consiguió 241 nodos (9.75%) como posibles puntos de falla.

- La base de datos con los posibles nodos de falla se representó sobre el diagrama unifilar del circuito de distribución y mediante la información de posfalla de los reconectores se filtraron posibles puntos de falla de forma gráfica. Adicional a los datos de posfalla, se observó la necesidad de contar con información adicional que permita excluir determinados puntos de fallas.

## **6.2 TRABAJOS FUTUROS.**

- Clasificar y parametrizar la información de entrada a la metodología para la ubicación de fallas que debe ser enviada por parte de los elementos de protección y medida hacia el sistema SCADA.
- Realizar la comunicación entre el sistema SCADA y el comando DPL para obtener de forma actualizada los datos y topología del circuito de distribución en estado de prefalla, durante falla y posfalla.
- Emplear el método de cálculo: *AC Load Flow, unbalanced, 3 Phase (ABC)* del módulo de flujo de potencia de DIgSILENT [2], con lo cual se logre reducir el error en las condiciones de prefalla empleadas para calcular las corrientes durante falla por el método de simulación completo.
- Teniendo en cuenta los requerimientos de la metodología propuesta para la ubicación de fallas, diseñar una base de datos en la cual se almacenen los eventos de falla ocurridos en el circuito de distribución. La información requerida es: punto real de falla, datos de prefalla, durante falla y posfalla.

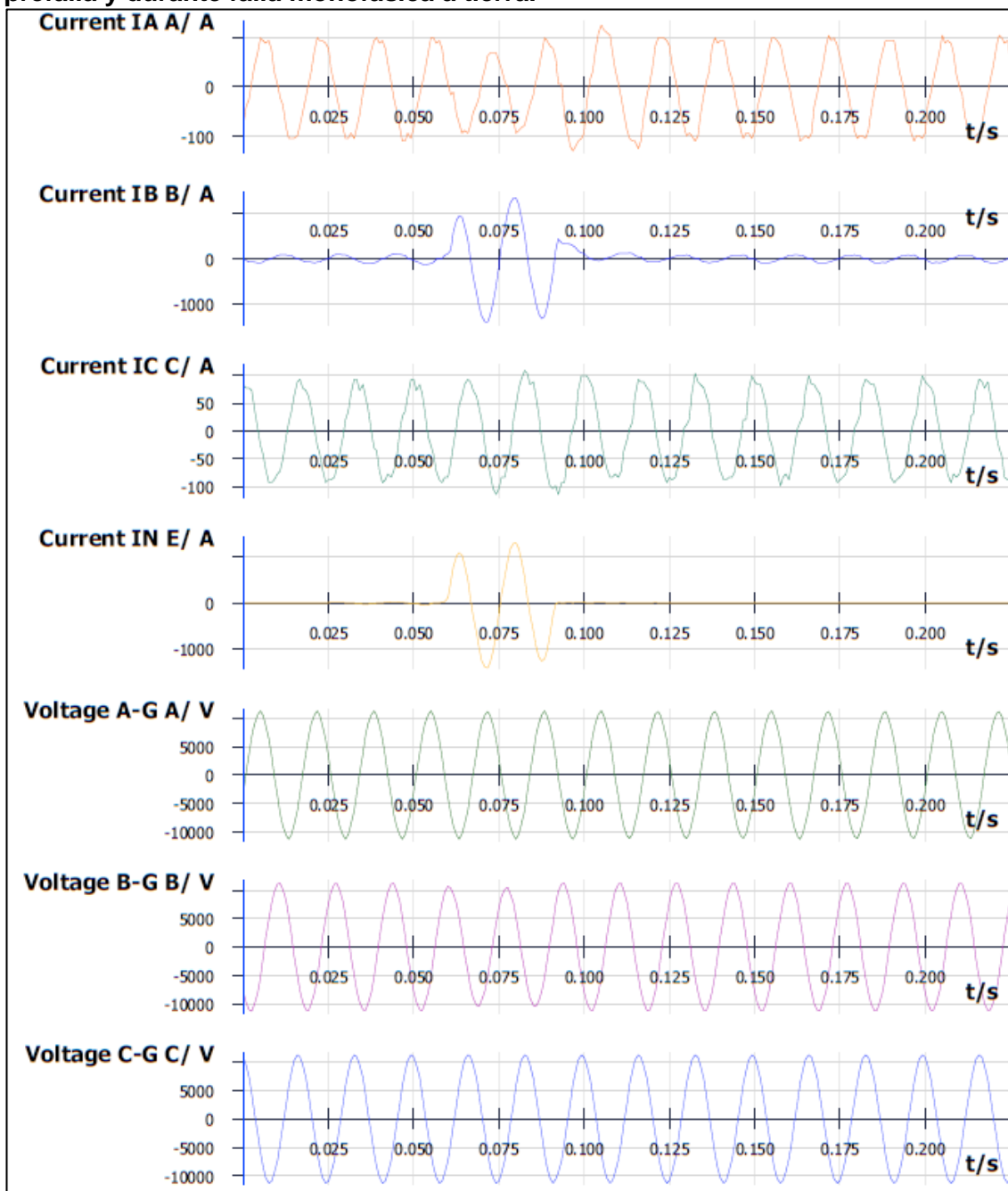
## BIBLIOGRAFÍA

- [1] J. J. Grainger and W. D. Stevenson, *Análisis de Sistemas de Potencia*, 1a ed. México, D.F., México: McGRAW-HILL/Interamericana de México, S.A. de C.V., 1996.
- [2] DlgSILENT PowerFactory 15, "User Manual." DlgSILENT GmbH., Gomaringen, Germany, p. 1386, 2014.
- [3] DlgSILENT PowerFactory 15, "Overhead Line Models: TypTow, TypLne, TypGeo." DlgSILENT GmbH., Gomaringen, Germany, p. 31, 2011.
- [4] DlgSILENT PowerFactory 15, "DGS Interface." DlgSILENT GmbH., Gomaringen, Germany, p. 42, 2014.
- [5] S. Ramírez, *Redes de Distribución de Energía*, 3ra ed. Manizales, Colombia: Centro de Publicaciones Universidad Nacional de Colombia, 2004.
- [6] DlgSILENT PowerFactory 15, "External Grid: ElmXnet." DlgSILENT GmbH., Gomaringen, Germany, p. 19, 2013.
- [7] J. J. Mora, "Localización de faltas en sistemas de distribución de energía eléctrica usando métodos basados en el modelo y métodos basados en el conocimiento," (Tesis de doctorado). Universidad de Girona, España, 2006.
- [8] W. J. Pisso Taimal, "Desarrollo de una aplicación que permita identificar el punto de falla en un circuito de 13,2 kV utilizando la información de los elementos de protección telegestionados. Caso: circuito Río Claro de la red de distribución de EPSA." Universidad del Valle, documento en curso.
- [9] R. Das, "Determining the locations of faults in distribution systems," 1998.
- [10] E. J. Gómez Ospina, "Desarrollo de un algoritmo de identificación de fallas en sistemas de distribución para pozos de extracción de petróleo," Universidad del Valle, 2015.
- [11] Comisión de Regulación de Energía y Gas - CREG, *Resolución No. 024 de 2005*. Bogotá D.C.: Imprenta Nacional de Colombia, 2005.
- [12] T. A. Short, *Electric Power Distribution Handbook*. Florida, Estados Unidos de America: CRC Press LLC., 2004.
- [13] IEB Ingeniería Especializada, "Curso avanzado: DlgSILENT programming Language -DPL- PowerFactory Version 14.0." p. 55.

## ANEXOS

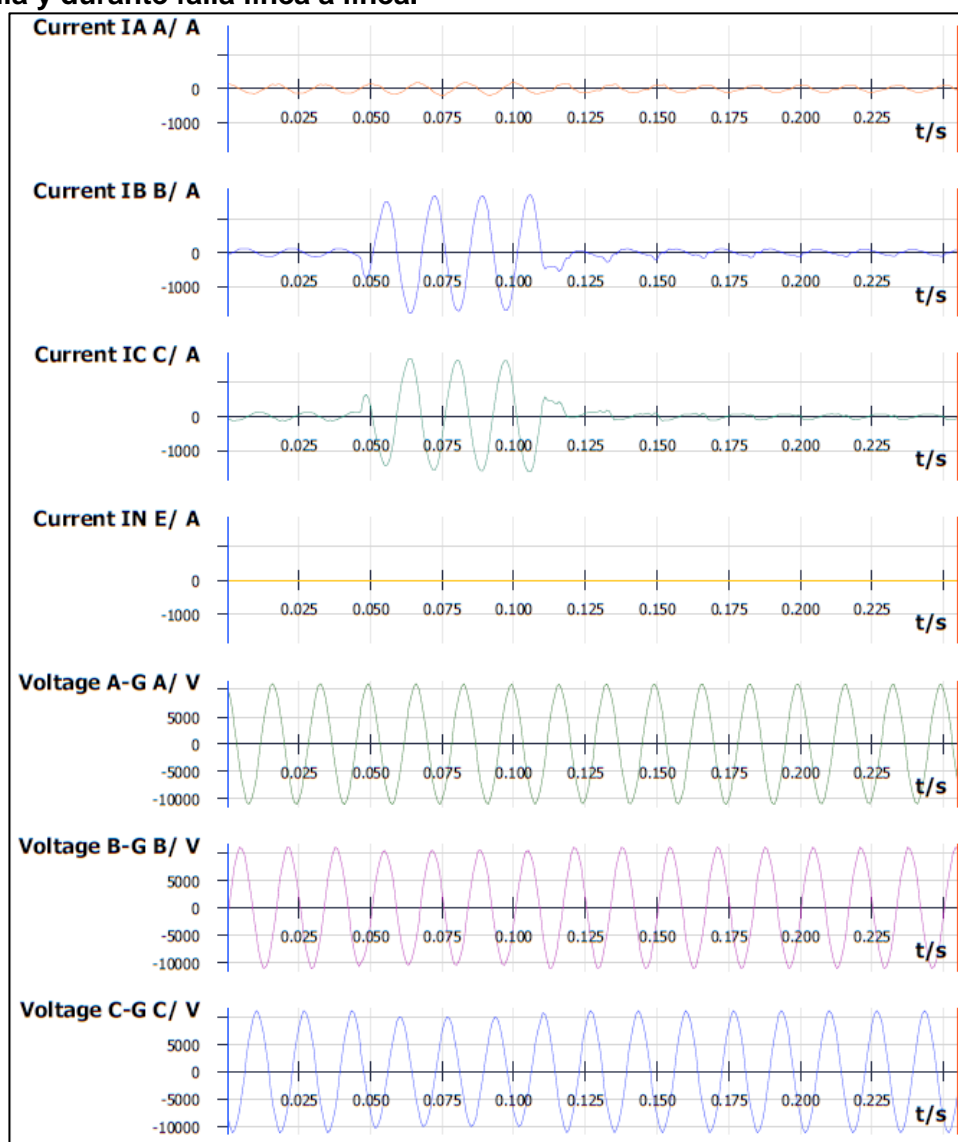
### Anexo A. Oscilogramas de tensión y corriente en prefalla y durante falla.

Figura 43. Caso de cortocircuito 2: Oscilograma de corriente y tensión en prefalla y durante falla monofásica a tierra.



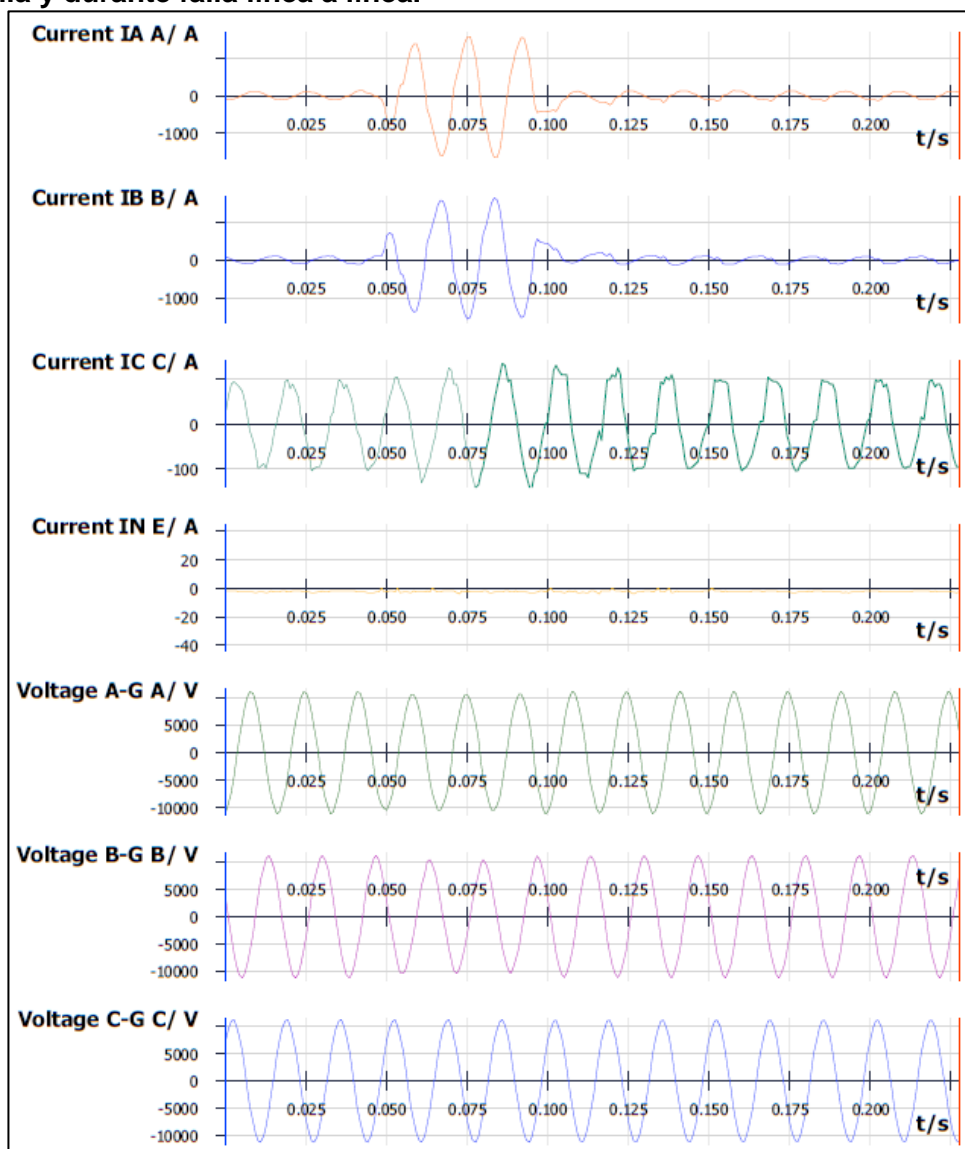
Fuente: Elaboración propia a partir del programa SIGRA 4.5.

**Figura 44. Caso de cortocircuito 3: Oscilograma de corriente y tensión en prefalla y durante falla línea a línea.**



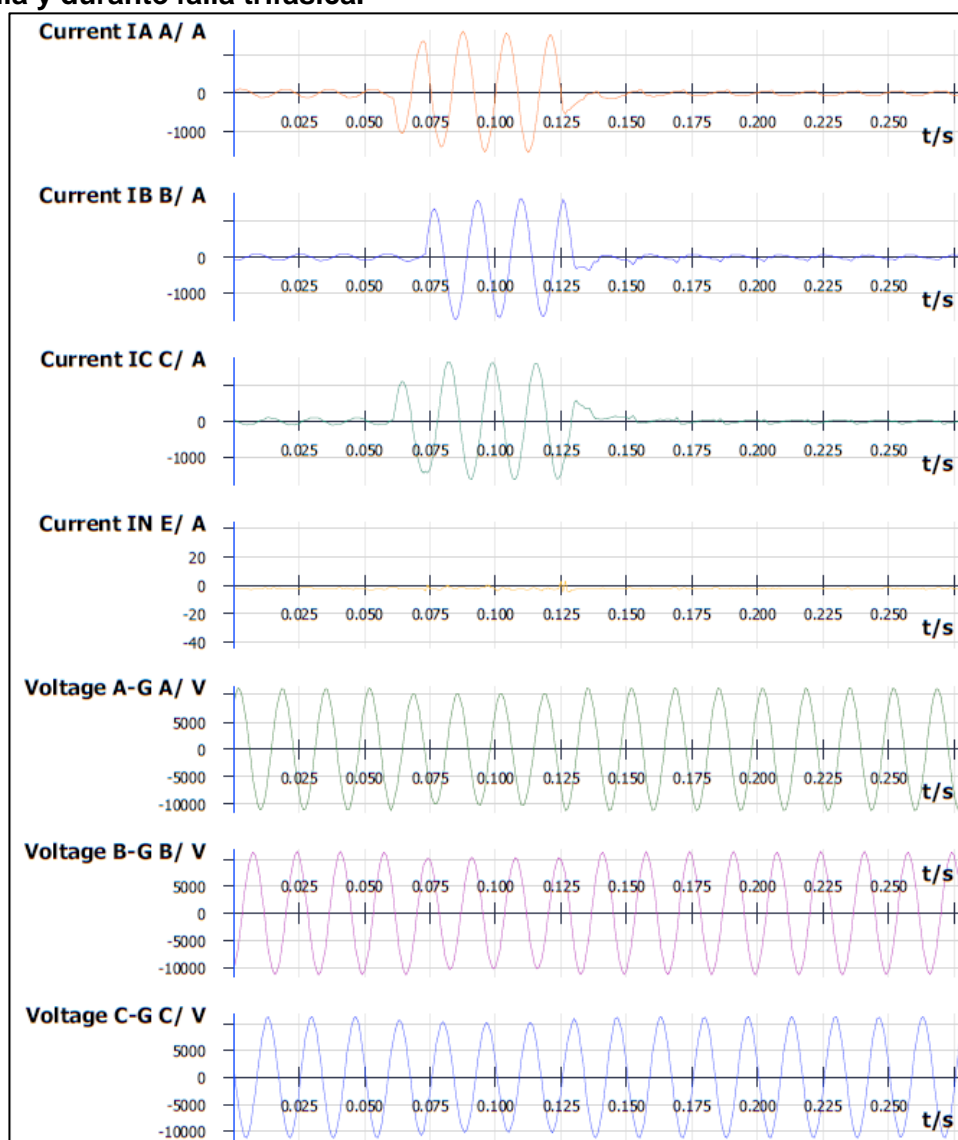
Fuente: Elaboración propia a partir del programa SIGRA 4.5.

**Figura 45. Caso de cortocircuito 4: Oscilograma de corriente y tensión en prefalla y durante falla línea a línea.**



Fuente: Elaboración propia a partir del programa SIGRA 4.5.

**Figura 46. Caso de cortocircuito 5: Oscilograma de corriente y tensión en prefalla y durante falla trifásica.**



Fuente: Elaboración propia a partir del programa SIGRA 4.5.

## Anexo B. Líneas de instrucciones (*script*) del comando DPL principal: *FaultReport*

```
! 1)*****
!Definición de variables
set aShcLocs,NodosCandidatos,AllExternalGrid, AllNode, AllNodeCount;

object pObj,VerNodoCandi,ExternalGrid,NodeToNode,
      pTmp,pTmp0;

int ierr,
    iline,iline0, contador,
    iBus,iBus0,fTypeToExcel,
    iTmp,iTmp0,
    iCountShc,
    iCountBus,iCountBus0, status,Line,NumberNodes,Nnodes,
    iLineLen;

double IkssA;

string aShc;
! 1)*****

iCountShc= 0;
iCountBus= 0;
ilineLen = 153;
pObj = NULL;

EchoOff(); !The following example de-activates the user-interface to speed up the calculations, after which the

! 2)+++++
!Restaura los nodos de "out of service" a 'service'
NodosCandidatos = AllRelevant('*.ElmTerm');
for (VerNodoCandi = NodosCandidatos.First(); VerNodoCandi; VerNodoCandi = NodosCandidatos.Next())
{
    VerNodoCandi:outserv=0;
}
! 2)+++++

! first reset calculation
ResetCalculation(); !Resets all calculations and destroys all volatile calculation results.

! 3)*****
!Selección del metodo para el cálculo del cortocircuito
if (method=0) { ! Método iec
shc:iopt_mde=1; ! selecciona 1:metodo IEC, "shc" está en el contenido de "FaultReport". "shc" es un 'objeto interno'
aShc = 'IEC'; ! Es una cadena de caracteres "string"
} else { ! complete
shc:iopt_mde=3; !Selecciona 3:metodo completo
aShc = 'complete'; ! Asigna la palabra Complete a la cadena "String"
}
! 3)*****

! 4)+++++
!Se determina si la falla sera simulada en todo los nodos o en los seleccionados por el usuario
! filtrado de nodos
if (iall) { ! "iall" está definido en "basic options" y calcula el ccto en todos los nodos
    Info('Calculating short circuits (%s) at all busbars',aShc); !"%s" imprime lo que este guardado en "aShc"
    shc:iopt_allbus = 1; !"Fault location" 1:Calcula el ccto en todos los nodos
}

else { ! si "iall" es cero efectúa lo que este dentro de este "else",
aShcLocs = SEL.GetContents(); ! Toma los datos de la selección general "set"
for (pTmp=aShcLocs.First(); pTmp; pTmp=aShcLocs.Next()) {
pObj = pObj:obj_id;
if (pObj) {
iTmp = pObj.IsNode();
if (iTmp) {
iCountBus = iCountBus + 1; ! increase number of busbars
} else {
pTmp:obj_id = NULL; ! reset reference
}
}
}
aShcLocs.Clear(); !Elimina lo que se encuentra en el "set" o selección general
if (iCountBus=0) { !es un entero que se le asigna el valor de cero
Error('Favor seleccionar algún nodo o cálculo de cortocircuito en todos los nodos (parámetro iall)');
exit();
} else {
Info('Calculando el cortocircuito (%s) en los nodos seleccionados',aShc);
shc:iopt_allbus = 0;
}
}
! 4)+++++

! 5)*****
!Se asigna el valor de resistencia y reactancia de falla
shc:Rf = Rf; !Accede a "Rf" de "shc" y asigna el valor dado en "basic options"
shc:Xf = Xf; !Accede a "Xf" de "shc" y asigna el valor dado en "basic options"
! 5)*****

ierr=0; ! Asigna cero a la variable entera "ierr", definida como "int"
fTypeToExcel=faulttype; ! Asigna cero a la variable entera "faulttype"

!+++++
! Se hace un ciclo para cada tipo de falla
while (faulttype<4) { ! se ejecuta un ciclo para cada tipo de falla
```

```

! 6)-----
!Para seleccionar y simular la falla solo en nodos activos
AllNode= AllRelevant('*.ElmTerm');
iCountBus0 = AllNode.Count(); !Returns the number of stored objects.
iline0=1; ! Asigna el valor de uno a "iline"
for (iBus0=iCountBus0-1; iBus0>=0; iBus0=iBus0-1) { !ciclo "for": inicio; condicion de terminación; expr. de
incremento
    pTmp0 = AllNode.Obj(iBus0); !"pTmp" es un objeto, retorna el objeto ubicado en el valor de "iBus"
    iTmp0 = pTmp0.IsEnergized(); ! devuelve 1 si el el objeto "pTmp" está en cortocircuito
    if (iTmp0) {
        pTmp0:dp11 = iline0; ! line in matrix
        iline0 = iline0+1;
        continue;
    }
    AllNode.Remove(pTmp0); !Removes an object from the set: remueve el objeto "pTmp".
} !fin de ciclo "for"

iCountBus0 = AllNode.Count(); !Returns the number of stored objects.
AllNode.SortToVar(0,'loc_name'); !
AllNodeCount=AllNode;
AllNodeCount.SortToVar(0,'loc_name'); !
! 6)-----

NumberNodes=AllNodeCount.Count();
NodeToNode=AllNodeCount.First();

! 7)=====
!Se realiza la simulacion nodo a nodo, mediante el metodo completo
for(Nnodes=NumberNodes-1; Nnodes>=0; Nnodes=Nnodes-1){
    shc:shcobj = NodeToNode;
    ! calculate short circuits. llama o ejecuta en Script "ShcCalc" contenido en "FaultReport"
    ierr = ShcCalc.Execute(shc,faulttype,SinglePhaFaul,DoubPhaFaul);
    if (ierr) {
        continue;
    }
    if (iCountShc=0) { ! only first time; inicialmente se asigna el valor de cero
        if (iall) { ! selected busbars, En "basic options" se hace "iall" iguala uno (1)
            aShcLocs = AllRelevant('*.ElmTerm'); !get all relevant objects; returns all calculation relevant objects.
        } else { !
            aShcLocs = SEL.AllBars();
        }
    }
    iCountBus = aShcLocs.Count(); !Returns the number of stored objects.
    iline=1; ! Asigna el valor de uno a "iline"
    for (iBus=iCountBus-1; iBus>=0; iBus=iBus-1) { !ciclo "for": inicio; condición de terminación; expr. de incremento
        pTmp = aShcLocs.Obj(iBus); !"pTmp" es un objeto, retorna el objeto ubicado en el valor de "iBus"
        iTmp = pTmp.IsNode(); !Returns 1 if object "pTmp" is a node (terminal or busbar).
        if (iTmp) { ! es un nodo, se ejecuta
            iTmp = pTmp.IsShortCircuited(); ! devuelve 1 si el el objeto "pTmp" está en cortocircuito
            if (iTmp) {
                pTmp:dp11 = iline; ! line in matrix
                iline = iline+1;
                continue;
            }
        }
        aShcLocs.Remove(pTmp); !Removes an object from the set: remueve el objeto "pTmp".
    } !fin de ciclo "for"

    iCountBus = aShcLocs.Count(); !Returns the number of stored objects.
    if (iCountBus) { !siempre está ingresando a este if, e incluso con un nodo
        !0 on success, Ordena los objetos del conjunto a los nombres de las variables
        aShcLocs.SortToVar(0,'loc_name');
        InitMatrix.Execute(Results,AllNode);
        contador=1;
        contador=contador+1;
    }
    !
    if (iCountBus=0) { !es un entero
        continue; !continue with next row
    }
    ! store results in matrix
    !Ejecuta el script "WriteMatrix" ubicado en el contenido de "FaultReport"
    WriteMatrix.Execute(Results,NodeToNode,faulttype,IccSinlePhaRef,IccDoubPhaRef,IccThrePhaRef,PerErrCurr,PerErrVolt,VccSDT
    Fault);
    iCountShc = iCountShc + 1; ! es un entero
    NodeToNode = AllNodeCount.Next();
}!fn de ciclo "for" para cortocircuito nodo a nodo
! 7)=====

faulttype =4;
} !while (faulttype<4)
!+++++

shc:shcobj = NULL; !Coloca vacio en "Fault Location - User Selection" del módulo de ccto

! 8)*****
! Se define si mostrar los resultados serán mostrados en la ventana de salida de DigSILENT o en excel
if (iExcel) { ! "iExcel" es una variable con valor de 1 dada en "Basic Options"
    aShcLocs = SEL.AllBars();
    aShcLocs.SortToVar(0,'loc_name'); !
    iCountBus0 = AllNode.Count(); !Returns the number of stored objects.
    ToExcel.Execute(AllNode,Results,fTypeToExcel);
}
else {
    Output.Execute(iLineLen,aShcLocs,Results); ! Imprime los resultados en la ventana de salida de DigSILENT
}
! 8)*****
EchoOn(); !user-interface is re-activated again.

```



## Anexo C. Líneas de instrucciones (*script*) de los objetos internos del comando DPL principal: *FaultReport*

**Figura 47. Líneas de instrucciones (*script*) del objeto interno *ShcCalc* (comando DPL)**

```
int ierr;
ierr = 0;

! 3 phase short-circuit, "ifaulttype" está definido en "basic options" como un entero sin ningún valor
if (ifaulttype=1) {
    ! "shc" está definido en "basic options" como un objeto; "iopt_shc" eccede a 'Fault Type'
    shc:iopt_shc='spgf';
    shc:i_pspgf=SinglePhaFaul;
}
else if (ifaulttype=2) { ! 1 phase to ground short-circuit
    shc:iopt_shc='2psc';
    shc:i_p2psc=DoubPhaFaul;
}
else if (ifaulttype=3){ ! 2 phase short-circuit (B-C fault)
    shc:iopt_shc='3psc';
}
else if (ifaulttype=4) { ! 2 phase to ground (B-C-Ground)
    shc:iopt_shc='2pgf';
}

ierr = shc.Execute();
if (ierr=1) {
    output('Error: No se puede calcular el cortocircuito');
    exit();
}
```

**Figura 48. Líneas de instrucciones (*script*) del objeto interno *InitMatrix* (comando DPL)**

```
int iBusBars,
    iLine;
object pBus;

! "iBusBars" es un entero; "aBusBars" es un SET; ".Count()" Returns the number of stored objects.
iBusBars = aShcLocs.Count();

! Se asigna el nombre de las columnas de la matriz "Results"
!".Init()" Initializes the result object. This is required for all result files that are not stored
!in the DPL command object; reurnn: 0 on success
pMat.Init(iBusBars,15);
!".ColLbl()" Sets or reads the label of the C'th column; return: Assigned or read column label
pMat.ColLbl('Sf,A kV',1);
pMat.ColLbl('Sf,B kV',2);
pMat.ColLbl('Sf,C kV',3);
pMat.ColLbl('Sf,A kA',4);
pMat.ColLbl('Sf,B kA',5);
pMat.ColLbl('Sf,C kA',6);
pMat.ColLbl('Sf,N kA',7);
pMat.ColLbl('2f,A kV',8);
pMat.ColLbl('2f,B kV',9);
pMat.ColLbl('2f,C kV',10);
pMat.ColLbl('2f,A kA',11);
pMat.ColLbl('2f,B kA',12);
pMat.ColLbl('2f,C kA',13);
pMat.ColLbl('3f,ABC kV',14);
pMat.ColLbl('3f,ABC kA',15);

!asigna el nombre de las filas
for (pBus=aShcLocs.First(); pBus; pBus = aShcLocs.Next()) { !"pBus" es un objeto;"aBusBars" es un SET;
    iLine = pBus:dp11;
    pMat.RowLbl(pBus:loc_name,iLine);!".RowLbl()":Sets or reads the label of the R'th row; "pBus" y "pMat" es un objeto
}
```

**Figura 49. Líneas de instrucciones (script) del objeto interno *WriteMatrix* (comando DPL)**

```

int iLine,iCol, iOff, iPhase;
object pBus,FirstNode,ExternalGrid;
double dMaxCurr,IkssA,MaxPercCurr,MinPercCurr,MaxPercVolt,MinPercVolt, dMaxPhi, dTmp;
set AllExternalGrid;

AllExternalGrid = AllRelevant('*.ElmXnet');
ExternalGrid = AllExternalGrid.First();
! 1)+++++
!FALLA MONOFÁSICA
if (ftype=1) { ! unbalanced, "ftype" se defien en "Basic Options" sin valor
pBus=aBusBars;
if (pBus) {
iLine= pBus:dpl1; ! row (fila) in matrix, "iLine" es un entero
iCol=1;
MaxPercCurr=1+(PerErrCurr/100);
MinPercCurr=1-(PerErrCurr/100);
MaxPercVolt=1+(PerErrVolt/100);
MinPercVolt=1-(PerErrVolt/100);
!CAMBIAR O VERIFICAR LA FASE SELECCIONADA COMO REFERENCIA (VOLTAJE)
if (IccSinlePhaN*MinPercCurr <= ExternalGrid:m:I0x3:bus1.and.ExternalGrid:m:I0x3:bus1<=IccSinlePhaN*MaxPercCurr.and.
VccSDTFault*MinPercVolt<=ExternalGrid:n:U:bus1:A.and.ExternalGrid:n:U:bus1:A<=VccSDTFault*MaxPercVolt)
{
pMat.Set(iLine,iCol,ExternalGrid:n:U:bus1:A);
iCol = iCol + 1;
pMat.Set(iLine,iCol,ExternalGrid:n:U:bus1:B);
iCol = iCol + 1;
pMat.Set(iLine,iCol,ExternalGrid:n:U:bus1:C);
iCol = iCol + 1;
pMat.Set(iLine,iCol,ExternalGrid:m:Ikss:bus1:A); ! pMat.Set(iLine,iCol,pBus:n:U:bus1:A);
iCol = iCol + 1;
pMat.Set(iLine,iCol,ExternalGrid:m:Ikss:bus1:B);
iCol = iCol + 1;
pMat.Set(iLine,iCol,ExternalGrid:m:Ikss:bus1:C);
iCol = iCol + 1;
pMat.Set(iLine,iCol,ExternalGrid:m:I0x3:bus1);
}
} !
}!
! 1)+++++
! 2)*****
!FALLA BIFÁSICA
if (ftype=2) { ! unbalanced, "ftype" se defien en "Basic Options" sin valor
pBus=aBusBars;
if (pBus) {
iLine= pBus:dpl1; ! row (fila) in matrix, "iLine" es un entero
iCol=8;
MaxPercCurr=1+(PerErrCurr/100);
MinPercCurr=1-(PerErrCurr/100);
MaxPercVolt=1+(PerErrVolt/100);
MinPercVolt=1-(PerErrVolt/100);
!CAMBIAR LA FASE SEL. COMO REF (VOLTAJE Y CORRIENTE)
if (IccDoubPhaRef*MinPercCurr <= ExternalGrid:m:Ikss:bus1:C.and.ExternalGrid:m:Ikss:bus1:C<=IccDoubPhaRef*MaxPercCurr
.and.VccSDTFault*MinPercVolt<=ExternalGrid:n:U:bus1:A.and.ExternalGrid:n:U:bus1:A<=VccSDTFault*MaxPercVolt)
{
pMat.Set(iLine,iCol,ExternalGrid:n:U:bus1:A);
iCol = iCol + 1;
pMat.Set(iLine,iCol,ExternalGrid:n:U:bus1:B);
iCol = iCol + 1;
pMat.Set(iLine,iCol,ExternalGrid:n:U:bus1:C);
iCol = iCol + 1;
pMat.Set(iLine,iCol,ExternalGrid:m:Ikss:bus1:A); ! pMat.Set(iLine,iCol,pBus:n:U:bus1:A);
iCol = iCol + 1;
pMat.Set(iLine,iCol,ExternalGrid:m:Ikss:bus1:B);
iCol = iCol + 1;
pMat.Set(iLine,iCol,ExternalGrid:m:Ikss:bus1:C);
}
}
IkssA= ExternalGrid:m:Ikss:bus1:B; !e:snss; IkssA= ExternalGrid:n:U:bus1:A
}
} ! 2)*****
! 3)+++++
!FALLA TRIFÁSICA
if (ftype=3) { ! se ejecuta antes que el "if"
pBus=aBusBars;
if (pBus) {
iLine= pBus:dpl1; ! row (fila) in matrix, "iLine" es un entero
iCol=14;
MaxPercCurr=1+(PerErrCurr/100);
MinPercCurr=1-(PerErrCurr/100);
MaxPercVolt=1+(PerErrVolt/100);
MinPercVolt=1-(PerErrVolt/100);
! NO ES NECESARIO CAMBIAR FASE DE REFERENCIA
if (IccThrePhaRef*MinPercCurr <= ExternalGrid:m:Ikss:bus1:A.and.ExternalGrid:m:Ikss:bus1:A<=IccThrePhaRef*MaxPercCurr.and.VccSDTFault*MinPercVolt<=ExternalGrid:n:U:bus1:A.and.ExternalGrid:n:U:bus1:A<=VccSDTFault*MaxPercVolt)
{
pMat.Set(iLine,iCol,ExternalGrid:n:U:bus1:A);
iCol = iCol + 1;
pMat.Set(iLine,iCol,ExternalGrid:m:Ikss:bus1:A); ! pMat.Set(iLine,iCol,pBus:n:U:bus1:A);
}
}
}
}

```

**Anexo D. Base de datos con la información de voltajes y corrientes para todos los posibles nodos de falla y la ubicación grafica en diagrama unifilar para el caso de cortocircuito 1.**

Este caso de cortocircuito corresponde a una falla monofásica de la fase C a tierra, la cual ocurrió en el nodo 20921. Es relevante mencionar que para este caso se realizaron las simulaciones con una resistencia de falla de 29.516 ohm. La información complementaria utilizada como datos de entrada para determinar la base de datos puede ser consultada en el numeral 4.3.6

En la Figura 50 se presenta un resumen de la base de datos con los posibles nodos de falla y se resalta que el nodo real donde ocurrió la falla esté contenido en la base de datos.

**Figura 50. Base de datos con la información de voltaje y corriente para todos los posibles nodos de falla del caso de cortocircuito 1.**

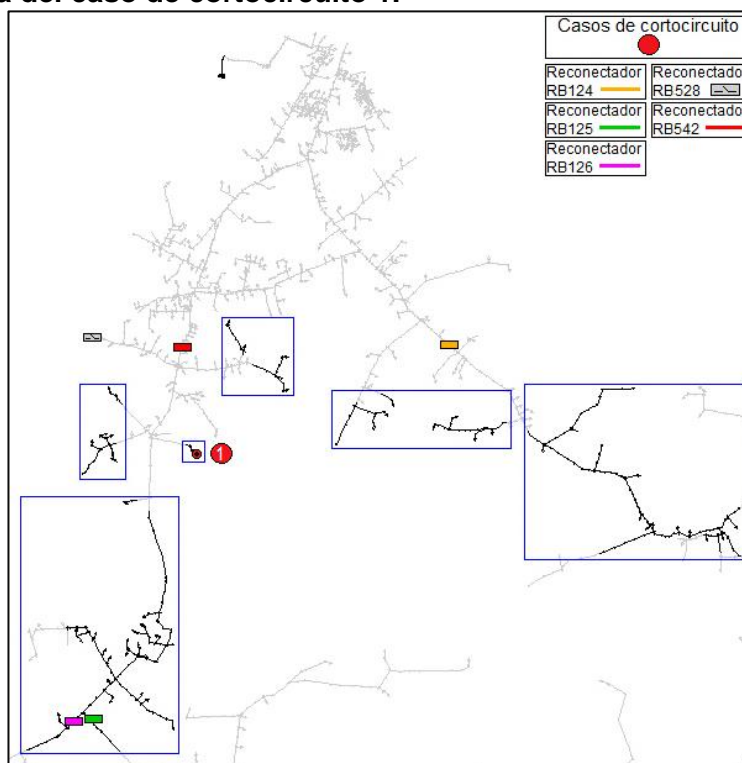
	A	B	C	D	E	F	G	H
1		Falla 1fase	Falla 1fase	Falla 1fase	Falla 1fase	Falla 1fase	Falla 1fase	Falla 1fase
2	Nodo	Fase A-t(L150)	Fase B-t(L150)	Fase C-t(L150)	Fase A(L150)	Fase B(L150)	Fase C(L150)	Cond. de N(L150)
3		[kV]	[kV]	[kV]	[kA]	[kA]	[kA]	[kA]
4	101080REPETI	7.9645	7.9577	7.8891	0.0891	0.0933	0.2843	0.1996
5	101081	7.9645	7.9577	7.8890	0.0891	0.0932	0.2831	0.1983
6	13311	7.9630	7.9585	7.9001	0.0902	0.0936	0.3002	0.2141
7	16264	7.9630	7.9584	7.8995	0.0901	0.0937	0.3052	0.2193
8	16265	7.9630	7.9584	7.8994	0.0901	0.0936	0.3045	0.2185
9	16268	7.9630	7.9584	7.8999	0.0901	0.0937	0.3045	0.2186
10	16269	7.9630	7.9584	7.9000	0.0901	0.0936	0.3035	0.2176
11	16270	7.9630	7.9584	7.9000	0.0902	0.0936	0.3025	0.2165
12	16271	7.9630	7.9585	7.9001	0.0902	0.0936	0.3015	0.2155
105	20921	7.9637	7.9578	7.8945	0.0893	0.0937	0.3044	0.2195
233	42838	7.9635	7.9584	7.8944	0.0901	0.0933	0.2854	0.1988
234	42839	7.9635	7.9584	7.8943	0.0901	0.0933	0.2851	0.1985
235	42840	7.9635	7.9585	7.8943	0.0901	0.0933	0.2848	0.1982
236	42843	7.9635	7.9585	7.8943	0.0901	0.0933	0.2837	0.1971
237	42844	7.9635	7.9585	7.8945	0.0901	0.0933	0.2830	0.1963
238	43841REP	7.9635	7.9585	7.8942	0.0901	0.0933	0.2846	0.1979
239	43842REP	7.9635	7.9585	7.8942	0.0901	0.0933	0.2844	0.1977
240	44227	7.9637	7.9578	7.8946	0.0893	0.0937	0.3034	0.2185
241	44228	7.9637	7.9578	7.8946	0.0894	0.0937	0.3032	0.2183
242	44229	7.9637	7.9578	7.8945	0.0894	0.0937	0.3030	0.2181
243	44230	7.9637	7.9578	7.8945	0.0894	0.0937	0.3029	0.2180
244	44231	7.9637	7.9578	7.8944	0.0894	0.0937	0.3027	0.2177

Fuente: Elaboración propia.

Para este tipo de cortocircuito, considerado de alta impedancia, se obtuvo 241 posibles nodos de falla de un total de 2472 nodos. Esto equivale a reducir la búsqueda del punto de falla en un 9.75% del total de nodos.

En la Figura 51 se ha ubicado gráficamente el listado de posibles nodos de falla sobre el diagrama unifilar del circuito Río Claro 13.2 kV, los cuales fueron obtenidos en la base de datos mostrada en la Figura 50. Con líneas de color negro se resaltan la ubicación de los nodos contenidos en la base de datos y con recuadros de color azul se ha encerrado por zonas todos los posibles nodos de falla.

**Figura 51. Ubicación grafica sobre el diagrama unifilar para todos los posibles nodos de falla del caso de cortocircuito 1.**



Fuente: Elaboración propia.

Con la información del estado de los elementos de corte en posfalla es posible reducir el número de nodos de la base de datos. Para este caso de cortocircuito, en el Modulo de Operaciones de EPSA no se encontró información de maniobras por parte del interruptor cabecera (L150) o de los reconectores (RB124, RB125, RB126, RB528, RB542, y RB555)

Al analizar el oscilograma correspondiente a este caso de cortocircuito (véase la Figura 33) se observó que la corriente de falla al final fue disminuyendo gradualmente, lo que podría haber causado que el elemento de protección no ejecutara la orden de disparo (cambio de estado *on/off*).

Para este caso en particular y para las fallas transitorias en donde no operan los elementos de protección es relevante disponer de los datos durante falla en los elementos de corte ubicados a lo largo del circuito. Con esta información se puede filtrar los posibles nodos de falla tal como se realizó al tener el estado *on/off* de los elementos de corte en posfalla (véase el numeral 5.3.3)

Además, es posible filtrar información de la base de datos para eventos transitorios o cuando no actúan las protecciones si se dispone de información adicional, como lo es zonificar aquellas áreas o lugares del circuito de distribución donde sea alta la probabilidad de ocurrencia de fallas.

**Anexo E. Base de datos con la información de voltajes y corrientes para todos los posibles nodos de falla y la ubicación grafica en diagrama unifilar para el caso de cortocircuito 2.**

Este caso de cortocircuito corresponde a una falla monofásica entre la fase B y tierra ocurrida en el nodo 15222. La información complementaria y los datos de entrada para determinar la base de datos puede ser consultada en el numeral 4.3.6. En la Figura 52 se presenta un resumen de la base de datos obtenida para 30 posibles nodos de falla, además se verifica y se resalta que el nodo real donde ocurrió la falla este contenido en esta base de datos.

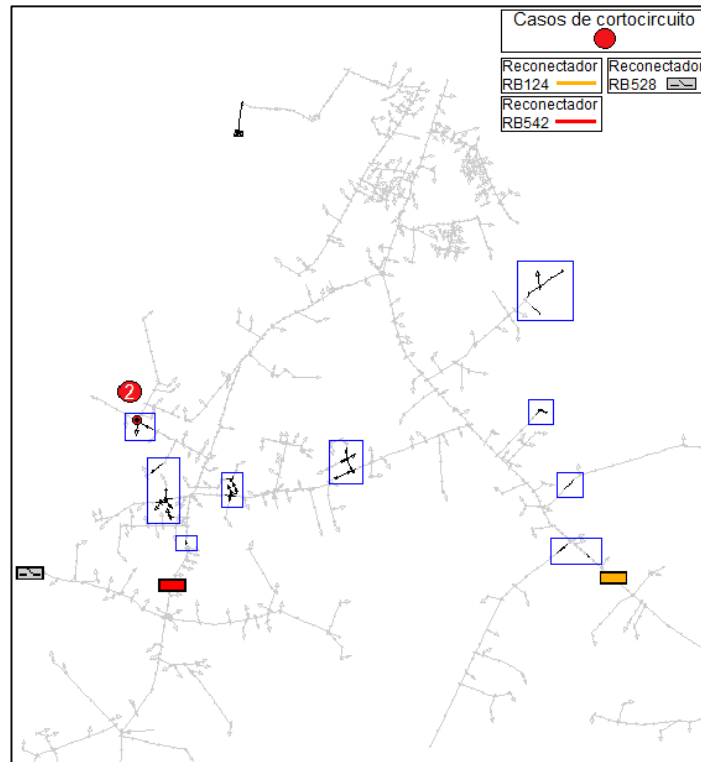
**Figura 52. Base de datos con la información de voltaje y corriente para todos los posibles nodos de falla del caso de cortocircuito 2.**

	A	B	C	D	E	F	G	H
1		Falla 1fase	Falla 1fase	Falla 1fase	Falla 1fase	Falla 1fase	Falla 1fase	Falla 1fase
2	Nodo	Fase A-t(L150)	Fase B-t(L150)	Fase C-t(L150)	Fase A(L150)	Fase B(L150)	Fase C(L150)	Cond. de N(L150)
3		[kV]	[kV]	[kV]	[kA]	[kA]	[kA]	[kA]
4	14736	7.8941	7.2807	7.9176	0.0633	0.9627	0.0612	0.9190
5	14742	7.8942	7.2765	7.9178	0.0632	0.9624	0.0613	0.9191
6	14743	7.8943	7.2832	7.9176	0.0632	0.9537	0.0613	0.9102
7	14768	7.8946	7.2924	7.9162	0.0640	0.9618	0.0617	0.9147
8	14769	7.8944	7.2841	7.9163	0.0640	0.9744	0.0617	0.9274
9	14770	7.8944	7.2807	7.9164	0.0640	0.9796	0.0616	0.9327
10	14771	7.8944	7.2855	7.9163	0.0640	0.9723	0.0617	0.9253
11	14772	7.8945	7.2896	7.9162	0.0640	0.9660	0.0617	0.9189
12	14773	7.8946	7.2949	7.9162	0.0641	0.9590	0.0617	0.9118
13	14777	7.8946	7.2948	7.9162	0.0640	0.9582	0.0617	0.9110
14	14810	7.8941	7.2841	7.9163	0.0642	0.9890	0.0614	0.9417
23	15222	7.8943	7.2856	7.9174	0.0634	0.9531	0.0614	0.9090
24	16236	7.8945	7.2875	7.9165	0.0639	0.9632	0.0617	0.9168
25	16249	7.8947	7.2790	7.9168	0.0636	0.9599	0.0619	0.9144
26	16277	7.8947	7.2772	7.9168	0.0635	0.9560	0.0619	0.9108
27	19722	7.8941	7.2799	7.9177	0.0633	0.9636	0.0612	0.9200
28	19723	7.8942	7.2874	7.9176	0.0633	0.9538	0.0612	0.9100
29	19725	7.8942	7.2849	7.9176	0.0633	0.9571	0.0612	0.9133
30	19739	7.8942	7.2784	7.9178	0.0631	0.9581	0.0613	0.9150
31	229906	7.8942	7.2776	7.9180	0.0630	0.9544	0.0613	0.9118
32	30883	7.8940	7.2937	7.9159	0.0644	0.9946	0.0613	0.9462
33	51395	7.8942	7.2785	7.9177	0.0632	0.9598	0.0613	0.9165

Fuente: Elaboración propia.

El listado de nodos obtenidos en la Figura 52 es representado gráficamente sobre el diagrama unifilar del circuito de distribución Río Claro 13.2 kV. Con líneas de color negro se representa los posibles nodos de falla y con recuadros de color azul se agrupa por zonas los posibles nodos de falla. Esto se representa en la Figura 53.

**Figura 53. Ubicación grafica sobre el diagrama unifilar para todos los posibles nodos de falla del caso de cortocircuito 2.**



Fuente: Elaboración propia.

Al analizar la Figura 53 se observa que todos los posibles nodos de falla se ubican entre el interruptor cabecera y los reconectores RB528 y RB542, lo cual corresponde a una zona con alta presencia de ramificaciones. Es por esta razón que los posibles nodos de falla se encuentren dispersos por diferentes ramales.

Para filtrar posibles nodos de falla donde existen muchas ramificaciones del circuito es necesario contar con información adicional, como lo es zonificar aquellas partes del circuito donde es alta la probabilidad de ocurrencias de fallas.

**Anexo F. Base de datos con la información de voltajes y corrientes para todos los posibles nodos de falla y la ubicación grafica en diagrama unifilar para el caso de cortocircuito 4.**

El caso de cortocircuito 4 corresponde a una falla línea a línea entre la fase A y B ocurrida en el nodo 232416, la información complementaria sobre los datos de entrada para determinar la base de datos puede ser consultada en el numeral 4.3.6. En la Figura 54 se muestra la base de datos con la información de voltajes y corrientes de cortocircuito, además se resalta que el nodo real donde ocurrió la falla este contenido en la base de datos.

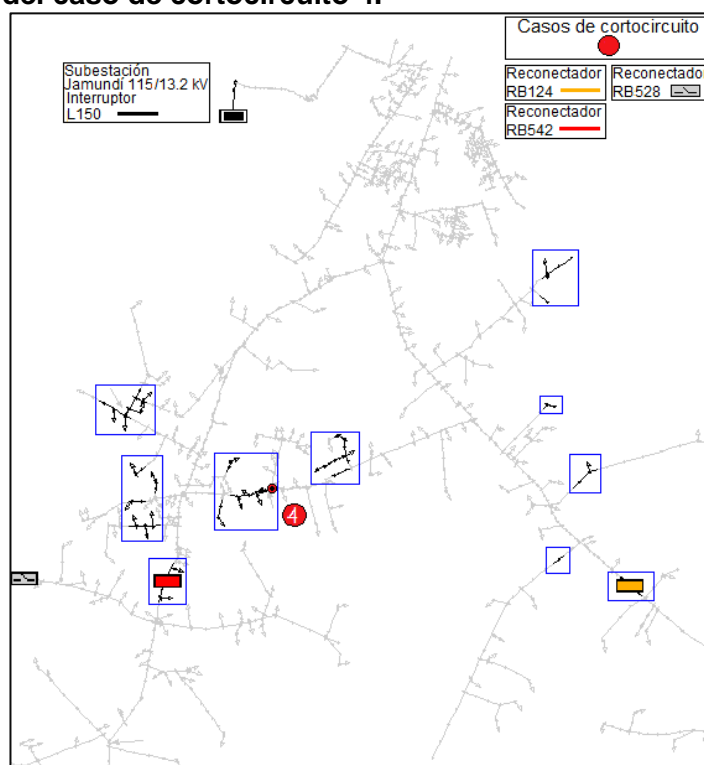
**Figura 54. Base de datos con la información de voltaje y corriente para todos los posibles nodos de falla del caso de cortocircuito 4.**

	A	I	J	K	L	M	N
1		Falla 2fases	Falla 2fases	Falla 2fases	Falla 2fases	Falla 2fases	Falla 2fases
2	Nodo	Fase A-t(L150)	Fase B-t(L150)	Fase C-t(L150)	Fase A(L150)	Fase B(L150)	Fase C(L150)
3		[kV]	[kV]	[kV]	[kA]	[kA]	[kA]
4	14737	7.5934	7.0209	7.8389	1.1210	1.0999	0.0733
5	14738	7.5964	7.0274	7.8389	1.1131	1.0922	0.0733
6	14744	7.5811	7.0148	7.8389	1.1264	1.1044	0.0733
7	14745	7.5876	7.0279	7.8389	1.1102	1.0885	0.0733
8	14746	7.5783	7.0147	7.8389	1.1259	1.1036	0.0733
9	14747	7.5816	7.0256	7.8389	1.1119	1.0897	0.0733
10	14748	7.5834	7.0318	7.8389	1.1041	1.0819	0.0733
11	14749	7.5849	7.0368	7.8389	1.0977	1.0756	0.0733
12	14768	7.6126	7.0278	7.8389	1.1168	1.0973	0.0733
13	14769	7.6102	7.0170	7.8389	1.1307	1.1112	0.0733
14	14771	7.6106	7.0188	7.8389	1.1284	1.1089	0.0733
15	14772	7.6118	7.0242	7.8389	1.1215	1.1019	0.0733
16	14773	7.6148	7.0312	7.8389	1.1129	1.0935	0.0733
17	14774	7.6178	7.0381	7.8389	1.1044	1.0851	0.0733
18	14775	7.6203	7.0439	7.8389	1.0971	1.0779	0.0733
19	14776	7.6230	7.0504	7.8389	1.0891	1.0700	0.0733
20	14777	7.6133	7.0309	7.8389	1.1128	1.0932	0.0733
21	14778	7.6150	7.0385	7.8389	1.1030	1.0835	0.0733
55	232416	7.5866	7.0424	7.8389	1.0906	1.0684	0.0733
56	232417	7.5857	7.0396	7.8389	1.0941	1.0720	0.0733
57	232418	7.5850	7.0372	7.8389	1.0972	1.0750	0.0733
58	30883	7.6604	7.0354	7.8389	1.1219	1.1064	0.0733

Fuente: Elaboración propia.

Para el caso de cortocircuito 4 se obtuvieron 55 posibles nodos de falla, donde la mayoría se encuentra entre el interruptor cabecera L150 y los reconectores RB124 y RB542. Esto se puede observar en la Figura 55

**Figura 55. Ubicación grafica sobre el diagrama unifilar para todos los posibles nodos de falla del caso de cortocircuito 4.**



Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 55 se ha señalado con líneas de color negro la ubicación de los posibles nodos de falla y con recuadros de color azul se ha agrupado la ubicación de los posibles nodos de falla. A pesar de haber obtenido 55 posibles puntos de falla ellos se encuentran bastante dispersos. Esto se debe a que en la zona donde ocurrió la falla es altamente ramificada y hacia la periferia de los ramales se ha encontrado una tendencia a ubicarse posibles nodos de falla.